

Cálculo de la resistencia del suelo al interpolarlo con el MEF Calculation of soil resistance by interpolating it with the FEM

Jesús Emmanuel Cerón-Carballo^{a,1*} , Eber Pérez-Isidro^a , Liliana Guadalupe Lizárraga-Mendiola^a ,
Humberto Iván Navarro-Gómez^a , Cutberto Rodríguez-Álvarez^a , Gilberto Ramos-Torres^b 

^a PE Ingeniería Civil, Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

^b Facultad de Ingeniería Civil Universidad del Estado de Sonora, 83000, Hermosillo, Sonora, México.

Resumen

La interpolación para calcular la resistencia de suelos mediante el método de elementos finitos (MEF) actualmente es útil al diseñar cimentaciones, ya que permite determinar la profundidad de desplante óptima donde se desea construir un cimiento aislado. Se utilizó el MEF para interpolar mediante datos obtenidos en exploraciones de campo, las propiedades mecánicas de un suelo cohesivo donde se diseñará las dimensiones de zapatas aisladas. A través del método tradicional se extrajeron muestras del suelo para realizarse pruebas de laboratorio y obtener su resistencia. Enseguida se determinaron las funciones de contorno, para discretizar el predio y obtener los espacios muestrales. Con los sondeos de campo se establecieron nodos de frontera. A continuación, se utilizaron funciones de interpolación, asociando la resistencia del terreno con la ubicación propuesta de las zapatas en puntos no muestreados en campo. Para validar se comparan los resultados del método tradicional y la interpolación, la simulación representó congruencia del 98% en la aplicación de ambos métodos.

Palabras Clave:

Interpolación, Elemento finito, Cimentaciones, Resistencia de suelos, Zapatas, Funciones de contorno, Nodos de frontera.

Abstract

The interpolation to calculate the resistance of soils by means of the finite element method (FEM) is currently useful when designing foundations, since it allows to determine the optimum foundation depth where it is desired to build an isolated foundation. The FEM was used to interpolate by means of data obtained in field explorations, the mechanical properties of a cohesive soil where the dimensions of isolated shoes were designed. Through the traditional method, soil samples were extracted for laboratory testing and resistance. Next, the contour functions were determined to discretize the property and obtain the sample spaces. Border nodes were established with field surveys. Next, interpolation functions were used, associating the ground resistance with the proposed location of the foundation at points not sampled in the field. To validate the results of the traditional method and the interpolation, the simulation represented congruence of 98% in the application of both methods.

Keywords:

Interpolation, Finite element, Foundations, Ground resistance, Footings, Contour functions, Border nodes

1. Introducción

El estudio de mecánica de suelos suele realizarse en dos etapas; la primera consiste en recabar información, especímenes o probetas en el sitio donde se construirá una edificación (SCE), y la segunda es complementaria a la primera, donde se realizan pruebas en laboratorio a las

muestras tomadas en campo para obtener sus propiedades mecánicas. Los resultados de ambas etapas permiten concluir cuales son las características físicas del material y del terreno. Esta información facilita durante el diseño de una estructura, la recomendación del tipo de cimentaciones con elementos continuos (zapatas corridas o combinadas) que tienen ventajas sobre los elementos aislados (zapatas aisladas) y sobre las cimentaciones profundas, en sitios problemáticos (Escolano-

*Autor para la correspondencia: jesus_ceronc@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: jesus_ceronc@uaeh.edu.mx (Jesús Emmanuel Cerón-Carballo), eber_perez@uaeh.edu.mx (Eber Pérez-Isidro), mendiola@uaeh.edu.mx (Liliana Guadalupe Lizárraga-Mendiola), humberto_navarro@uaeh.edu.mx (Humberto Iván Navarro-Gómez), profe_7479@uaeh.edu.mx (Cutberto Rodríguez-Álvarez), gilberto.ramos@unison.mx (Gilberto Ramos-Torres)

Sánchez, 2015). La exploración en campo se realiza dentro de la superficie del predio, donde la resistencia del terreno mantiene su valor en la zona con estratigrafía similar; además, la ubicación de los sitios de exploración tienen correspondencia geométrica y analítica con la ubicación de la cimentación de proyecto (Palomino-Tamayo, 2017). Sin embargo, en ocasiones el número de sondeos no es lo suficientemente representativo de las condiciones mecánicas del terreno. Es importante por lo tanto, tener la representatividad física de las condiciones del predio, que facilite el desarrollo de una metodología que permita el ingreso del valor de la resistencia como una variable aleatoria en zonas con estratigrafía similar (Argumedo, 2016).

Hoy en día, el análisis numérico se ha utilizado comúnmente para la solución de problemas de ingeniería. El método convencional de elementos finitos (MEF) es una herramienta poderosa para investigar diferentes problemas relacionados con la resistencia del suelo. Por ejemplo, en el contexto del presente estudio, el método de elementos finitos se puede utilizar para investigar excavaciones subterráneas (Chheng & Likitlersuang, 2018). El MEF es una herramienta poderosa para investigaciones numéricas, pero también tienen una serie de limitaciones. Estos métodos no pueden aplicarse para el análisis de medios ilimitados sin supuestos adicionales. Además, todo el dominio debe ser discretizado en MEF. Se pueden encontrar diferentes procedimientos numéricos en la literatura especialmente para resolver problemas de ingeniería civil de cimentaciones y túneles (Lü, Sun, & Low, 2011).

La aplicación del método de elementos finitos (MEF) en los problemas relacionados con la mecánica de los suelos, es a menudo singular, puesto que la definición del dominio del estudio corresponde con vértices interiores al lindero del predio a analizar.

Una vez que se ha discretizado dicho dominio, el campo de las variables involucradas se aproxima mediante funciones de interpolación; estas son definidas por las condiciones de contorno, expresadas en términos de los valores nodales de la variable dependiente y el de sus derivadas. Para la interpolación las funciones de forma (FF) deben cumplir con dos requerimientos de aplicación: ser compatibles y completivas. El primero asegura que la aproximación seccional de la variable dependiente sea continua; es decir, que la discretización se muestre en los contornos inter-elementos. Lo anterior da origen a una variable continua, que, a su vez, forma nuevas condiciones internas denominadas elementos conformes.

Para satisfacer el segundo requerimiento, las funciones de interpolación deben seleccionarse de tal modo que, si en el problema en estudio la variable dependiente es una constante, ésta debe ser, también, constante en la solución por medio del MEF. Las condiciones completivas son necesarias para asegurar que la solución aproximada por medio del MEF converja a la solución exacta. Esto sucede solo si el número de elementos presentes en la discretización aumenta de tal forma, que se genere un refinamiento de la malla (Cueto, 2012).

Los elementos de análisis, tanto los existentes como los nuevos, cuando satisfacen este requerimiento, se dice que convergen en una solución con elementos completos (Pineda-Contreras, 2013). La discretización, por consiguiente, consiste en un trazado con la geometría del elemento bidimensional simple (GEBS), llamado malla, que conforme las condiciones de contorno y disminuya el error de aproximación. Tales geometrías con vértices definidos se conectarán entre sí en los nodos de los contornos de los elementos, para que reúnan los requisitos de aplicación y sean compatibles y completivas. En los problemas bidimensionales no sólo se busca una solución aproximada a un problema de valor de contorno, sino también se debe aproximar el dominio del problema mediante una malla de elementos finitos apropiada. Luego, en el análisis de problemas bidimensionales, se tendrán dos tipos de errores: en la geometría de elementos, debido a la aproximación de la solución; y errores en la discretización, debido a la aproximación del dominio (González-Cueto, 2013).

Teniendo esto en cuenta, la principal contribución del presente trabajo es la introducción de la técnica de MEF que permiten interpolar mediante un código, utilizando discretizaciones para los subdominios, de tal manera que las mallas en las interfaces de campo, se interpolen para utilizar algoritmos apropiados para transferir la solución de un límite de subdominio a su vecino, así como para rastrear el esfuerzo de sus límites.

Estos algoritmos se heredan y se basan en la búsqueda proyectada rápida del vecino más cercano y la formulación conservadora residual ponderada con la cuadratura numérica. Por lo tanto, en este trabajo se realiza una comparación en el diseño de una cimentación por medio del método tradicional respecto a una interpolación Lagrangeana por medio del MEF. Lo anterior permitirá incrementar las variables de análisis con las cuales se diseñan los elementos base de una edificación, (Chheng & Likitlersuang, 2018).

1.1. Elementos bidimensionales

Existe una correspondencia entre el número de nodos, su localización, así como el número de variables primarias por nodo en un elemento finito. Los nodos considerados en el estudio son de tres tipos: los vértices en el lindero del predio (VL), los vértices en el contorno del espacio muestral (VC) y los vértices en el interior (VI), ubicados en donde se construyen las zapatas aisladas. Todos estos vértices y el número de términos son usados en las aproximaciones polinomiales de la variable dependiente sobre un elemento. Sin embargo, se asume que los VC en el estudio de suelos se ubican donde se realiza la prospección. Por otro lado, en problemas bidimensionales, la correspondencia entre el número de nodos NC (el cual es igual al número de términos en el polinomio de aproximación), y el grado del polinomio no sea única, (Palomino-Tamayo, 2017).

2. Materiales y métodos.

En el presente estudio se utilizó la exploración de pozos a cielo abierto (PCA), determinando datos de las características de mecánica de suelos, través del método tradicional (MT). Como se observa en la Figura 1, se realizó una interpolación

con los datos de la prospección en algunos puntos de control en el predio. Esta interpolación permite determinar por medio del MEF datos de los sitios no explorados en campo sin la necesidad de realizar más PCA.

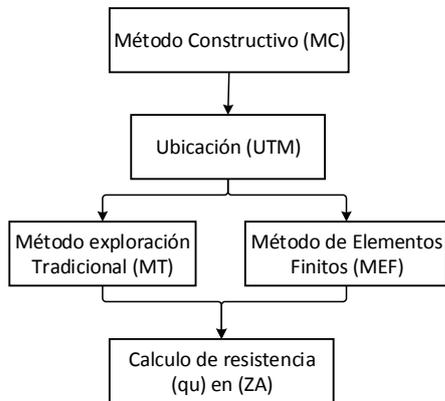


Figura 1: Diagrama de bloques del método constructivo.

2.1. Método Tradicional

El Método tradicional consiste en realizar la exploración de estratos por medio de una excavación de pozos a cielo abierto (PCA) y determinar su resistencia en base a una prospección referenciando cada PCA y ubicándolos con coordenadas de Unidades de medida Transversa de Mercator, (UTM).

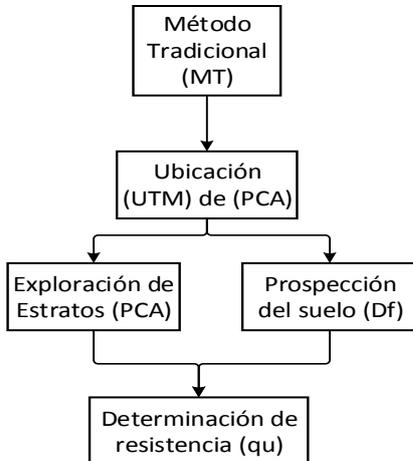


Figura 2: Diagrama de bloques del método tradicional.

2.1.1. Ubicación de los PCA

Las características del suelo (CS) en los PCA se utilizaron para conocer las CS en el SCE, mediante la aplicación del MEF. La ubicación de los PCA se observa en la Figura 3.

La zona de construcción es el SCE, en donde se realizó la exploración del PCA 5 y PCA 6. Dicha zona se encuentra ubicada dentro de la superficie de la GEBS 1 y GEBS 2, condición necesaria para aplicar la interpolación y determinar las CS en el SCE (Palomino-Tamayo, 2017).

Las definiciones de las coordenadas de los nodos de los VL se ubican fuera de la zona de construcción y en la parte interna del lindero del predio, de tal manera que en el GEBS 1, utilizando como frontera el PCA 3 – PCA 2 – PCA 1, se interpola la CS del PCA 5. Así mismo, en el GEBS 2, utilizando como frontera el PCA 4 – PCA 2 – PCA 3, se interpola la CS del PCA 6, como se observa en la Figura 4.

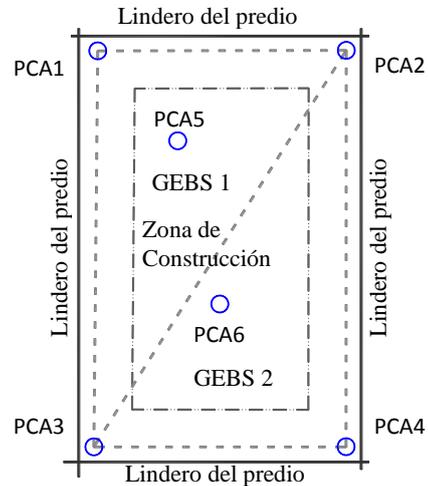


Figura 3: Representación gráfica de la ubicación de los PCA en la exploración del suelo.

2.1.2. Exploración de estratos.

Con base en las exploraciones de los PCA ubicados en los cuatro vértices que forman el contorno (VC) y dos en el interior del predio (VI), se determinaron los horizontes estratigráficos del terreno natural. En cada uno de los sondeos se encuentra un suelo cohesivo formado básicamente por arcilla color café, con materia orgánica y ligero contenido de gravas y arenas.

La capa superficial tiene un espesor medio (e) de cincuenta centímetros, además, como se observa en la Figura 4, en las capas subsecuentes hasta la profundidad de 4 metros, se observó una variación de ocho estratos, producto de la sedimentación natural. Se encontró en todos los estratos arcilla inorgánica de tonalidades café, con ligero contenido de gravas y arenas, cuya clasificación del suelo denota una toba piroclástica beige, (localmente denominada como tepetate), con un grado de resistencia a la compactación (qu).

La estructura del suelo encontrada en los PCA, es de tipo elástico lineal, homogénea e isotropa en la totalidad del predio.

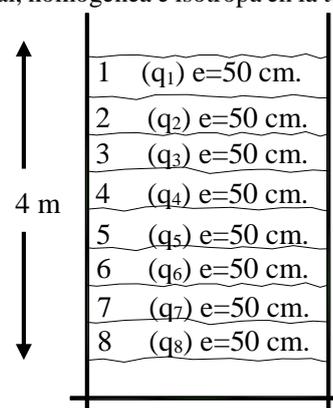


Figura 4: Representación gráfica de las exploración de estratos.

2.1.3. *Prospección de suelo.*

Se realizó la excavación en seis pozos a cielo abierto como método tradicional para explorar los estratos (a cada 50 cm) y determinar la resistencia del suelo; se tomaron dos muestras de 20 kg de peso, en cada uno de los ocho estratos (espesor total de 8 m). Los especímenes recolectados son de dos tipos: alterados e inalterados. En los primeros, la muestra alterada de suelo se protege contra las pérdidas de humedad, colocándose en un recipiente etiquetado; en el segundo, se toma la muestra inalterada labrando una oquedad en la pared del pozo, e inmediatamente se protege en capas de manta impermeabilizada con brea y parafina, para el traslado al laboratorio (Poenaru, 2016).

2.1.4. *Determinación de la resistencia de suelo en los PCA*

Se analizaron las cargas de colapso y los mecanismos de falla presentes por la transmisión de cargas producto de la cimentación, asumiendo que donde termina cada estrato sea considerado posible profundidad de desplante (D_f) de la cimentación. Por consiguiente, los resultados numéricos en cada PCA, se verifican mediante soluciones analíticas (Vuhoang, 2018). Las características físicas determinadas de las pruebas de laboratorio en la exploración de estratos se relacionan en la Tabla 1.

Tabla 1: Resistencia de terreno (q_u) en los PCA, determinadas por el MT, en las profundidades (D_f) indicadas.

	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	PCA5	PCA6
D_f	q_u	q_u	q_u	q_u	q_u	q_u
<i>mts</i>	T/m2	T/m2	T/m2	T/m2	T/m2	T/m2
0.5	12.67	11.55	14.76	15.16	12.63	13.36
1	13.47	12.19	16.46	16.35	13.96	14.72
1.5	13.98	12.66	16.8	16.97	14.32	15.26
2	14.88	13.31	17.49	18.58	14.78	16.24
2.5	15.72	14.28	18.7	19.49	16.03	17.23
3	16.35	14.61	18.85	19.99	16.12	17.49
3.5	16.84	14.97	19.1	20.59	16.92	17.91
4	17.58	15.9	19.41	21.65	17.52	18.49

2.2. *Método de elementos finitos (MEF)*

El Método de elemento finito consiste en determinar las condiciones de frontera para interpolar por medio de las funciones de interpolación y calcular la resistencia de suelo en las ubicaciones de las zapatas aisladas

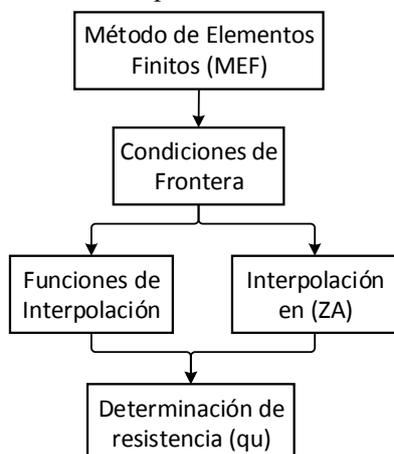


Figura 5: Diagrama de bloques del método de elemento finito.

2.2.1. *Condiciones de frontera*

Los nodos frontera son aquellos en donde las condiciones de las variables son conocidas (Figura 6). Por tal motivo, serán aquellos nodos en donde la prospección mediante el MT determinó las resistencias del suelo. La localización, el número de las variables primarias por nodo en un elemento finito, y el número de términos usados en las aproximaciones, son definidos en la Tabla 1, donde se relacionan las coordenadas en Unidades Transversas de Mercator (UTM) (Romano, 2016).

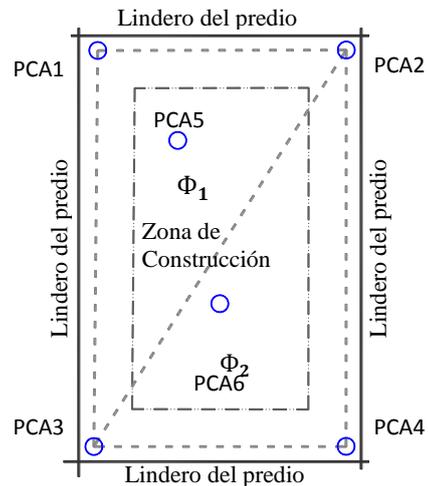


Figura 6: Representación gráfica de la discretización (Φ_i) en el predio de estudio.

Tabla 2: Coordenadas UTM de los PCA.

Localización de nodos (UTM)		
No.	X	Y
PCA 1	522,494.76	2,221,196.43
PCA 2	522,529.76	2,221,196.49
PCA 3	522,494.31	2,221,141.70
PCA 4	522,530.01	2,221,141.57
PCA 5	522,506.41	2,221,183.45
PCA 6	522,511.98	2,221,161.70

Además, el predio en estudio se discretizó en dos superficies geométricas triangulares, definidas en la Figura 2. Por tanto, los vértices de los dos espacios serán los siguientes: $\Phi_1 = PCA3 - PCA2 - PCA1$, $\Phi_2 = PCA4 - PCA2 - PCA3$. A partir de estas condiciones se determinan las constantes de las FC, relacionadas en la Tabla 2.

Tabla 3: Determinación de las constantes del espacio discretizado Φ_1 y Φ_2

PCA3-PCA2-PCA1	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	Funciones de Contorno	Φ_1			
					-	x	y	
$a(m) =$	77,692,533.21	0.06	-34.99		$N1 =$	40,566.24	0	-0.02
$b(m) =$	-27,597,723.06	54.73	-0.45		$N2 =$	-14,409.82	0.03	0
$c(m) =$	-50,092,894.94	-54.79	35.44		$N3 =$	-26,155.41	-0.03	0.02
$Ae(m2) =$	957.6	1,915.20						
PCA4-PCA2-PCA3	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	Φ_2				
$a(m) =$	50,092,894.94	54.79	-35.44	$N1 =$	25,556.27	0.03	-0.02	
$b(m) =$	-79,345,031.92	0.12	35.69	$N2 =$	-40,480.05	0	0.02	
$c(m) =$	29,254,097.08	-54.92	-0.25	$N3 =$	14,924.78	-0.03	0	
$Ae(m2) =$	980.05	1,960.10						

El éxito de este enfoque es el analizar un punto de referencia perteneciente al espacio discretizado, que será el nodo a interpolar llamado nodo nuevo (Nn) [$Nn \in \Phi_i$] (Wobbes, 2017).

2.2.2. *Funciones de interpolación*

Una vez generada la FC en cada GEBS, se utiliza la ecuación 2, en cada espacio Φ_i , como se observa en la Tabla 1. Se asocia el valor (x) de la resistencia del suelo con la ubicación de las zapatas corridas, construyendo una superficie triangular que une los nodos en donde el valor de la variable es conocido (Figura 3). De tal forma que, mientras las variables se obtienen utilizando la ecuación 3, la simetría de las superficies geométricas permite que la función de interpolación (FI) para cada incógnita sea determinada por las funciones de contorno (Cortés, 2004).

El (MEF) es un método analítico, en donde se utilizaron las funciones de forma $N_i(x,y)$, de manera que las variables (x, y) son tomadas de las condiciones de frontera en los vértices de lindero VC y la superficie del predio sea el espacio a discretizar Φ_i . De tal manera, es posible conocer las características del suelo (CS) al interior del predio sin tener que realizar ensayos innecesarios. Las constantes de funciones de forma (FF) se determinan con la ecuación 1; las funciones de contorno (FC) o iniciales, con la ecuación 2; y la funciones para interpolar las características de la resistencia del terreno, con la ecuación 3, (Palomino-Tamayo, 2017).

$N_i^{(e)} = \frac{1}{2A_e} (a_i + b_i x + c_i y)$	(1)
$N_i(x,y)q_i = N_1 q_1 + N_2 q_2 + N_3 q_3$	(2)
$q_u = N_1 q_1 + N_2 q_2 + N_3 q_3$	(3)

Donde:

$N_i^{(e)}$:	Representa las funciones de forma.
A_e :	Representa la superficie del espacio muestral.
a, b, c:	Son las constantes de la geometría triangular.
N_1, N_2, N_3 :	Son las funciones de contorno para interpolar.
q_1, q_2, q_3 :	Son las resistencias determinadas del MT.
q_u :	Representa el valor interpolado del MEF.

Para determinar las funciones de contorno (FC) en cada término de la ecuación 1, se realiza la discretización del predio, utilizando la GEBS triangular; esto debido a la forma geométrica del predio. Esta discretización permite tener dos espacios muestrales de forma triangular (Φ_1, Φ_2), cuyos vértices corresponden con las coordenadas de los VC, Figura 6. En la ecuación 4 se obtiene el valor de la superficie de cada GEBS. Se observan las variables de la posición de los PCA, cuya numeración se considera de abajo hacia arriba y de izquierda a derecha (Palomino-Tamayo, 2017).

$$2A_e = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{vmatrix} = x_2 y_3 - x_3 y_2 + x_3 y_1 - x_1 y_3 + x_1 y_2 - x_2 y_1 \quad (4)$$

Las constantes de las funciones de contorno, del primer, segundo y tercer término de la ecuación 1 son obtenidas con la ecuación 5, correspondientemente, cuya numeración corresponde con la ubicación de cada VC.

$$\begin{matrix} a_1 = x_2 y_3 - x_3 y_2 & b_1 = y_2 - y_3 & c_1 = x_3 - x_2 \\ a_2 = x_3 y_1 - x_1 y_3 & b_2 = y_3 - y_1 & c_2 = x_1 - x_3 \\ a_3 = x_1 y_2 - x_2 y_1 & b_3 = y_1 - y_2 & c_3 = x_2 - x_1 \end{matrix} \quad (5)$$

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, fácil de modificar en comparación a un prototipo. Aunque es un método aproximado de cálculo, puede acercarse bastante al diseño óptimo.

2.2.3. *Interpolación de la ubicación de las ZA*

El MEF permite interpolar la ubicación de las zapatas mediante las coordenadas (x,y) en la ecuación 1, posterior a determinar las constantes de forma (a,b,c) y la superficie del espacio muestral (A).

2.2.4. *Determinación de la resistencia (qu)*

El MEF permite calcular la resistencia (qu) donde se cimentaran las zapatas aisladas por medio de la ecuación 3, utilizando las resistencias obtenidas del método tradicional (q_1, q_2, q_3).

2.3. *Método constructivo.*

El Método constructivo utilizado consiste en ubicar las zapatas aisladas, mediante la asignación de coordenadas UTM en su centro geométrico, se clasifican de acuerdo al espacio muestral generando con ello condiciones de frontera y a continuación designando los puntos de control en la ubicación de los PCA.

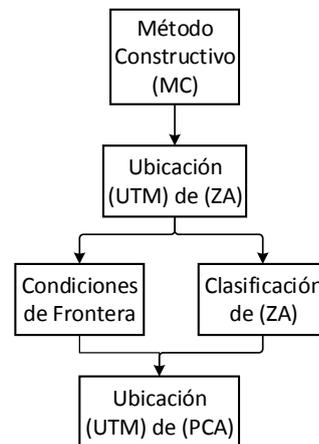


Figura 7: Diagrama de bloques del método constructivo.

2.3.1. *Ubicación UTM de las zapatas aisladas*

El predio seleccionado para este estudio tiene una geometría rectangular y una superficie de 1,928 m². Su topografía es regular, cuya pendiente media es del 4%. Se proyecta en el SCE un edificio de tres niveles formado por marcos rígidos, los cuales tienen cuatro crujías transversalmente, con separación de columnas de 6.5 m entre ejes, mientras que en el sentido longitudinal está formado por seis crujías con separación de columnas de 7 m entre ejes (Tabla 4).

Tabla 4: Coordenadas UTM de las ZA para generar las FI

No.	X	Y	No.	X	Y	No.	X	Y
1	522,500.72	2,221,190.44	13	522,512.10	2,221,176.46	25	522,523.51	2,221,161.72
2	522,506.47	2,221,190.45	14	522,517.85	2,221,176.47	26	522,500.42	2,221,154.69
3	522,512.22	2,221,190.46	15	522,523.63	2,221,176.48	27	522,506.17	2,221,154.70
4	522,517.97	2,221,190.47	16	522,500.54	2,221,169.06	28	522,511.92	2,221,154.70
5	522,523.75	2,221,190.48	17	522,506.29	2,221,169.07	29	522,517.67	2,221,154.71
6	522,500.66	2,221,183.44	18	522,512.04	2,221,169.08	30	522,523.45	2,221,154.72
7	522,506.41	2,221,183.45	19	522,517.79	2,221,169.09	31	522,500.36	2,221,147.69
8	522,512.16	2,221,183.46	20	522,523.57	2,221,169.10	32	522,506.11	2,221,147.70
9	522,517.91	2,221,183.47	21	522,500.48	2,221,161.69	33	522,511.86	2,221,147.71
10	522,523.69	2,221,183.48	22	522,506.23	2,221,161.70	34	522,517.61	2,221,147.71
11	522,500.60	2,221,176.44	23	522,511.98	2,221,161.70	35	522,523.40	2,221,147.72
12	522,506.35	2,221,176.45	24	522,517.73	2,221,161.71			

2.3.2. Condiciones de frontera

Estas condiciones se definen por la ubicación de los PCA 1, 2, 3 y 4, marcados con círculos en la figura 8, donde la resistencia del suelo es conocida, mediante pruebas de laboratorio.

2.3.1. Clasificación de las ZA

En el SCE se proyecta una cimentación superficial formada por zapatas aisladas (ZA) de concreto armado, que servirán para transmitir las cargas de la construcción. Por tal motivo, se utilizarán zapatas de tres tipos, esquineras (4), medianeras (16) e interiores (15); con un total de 35 ZA, como se observa en la Figura 5.

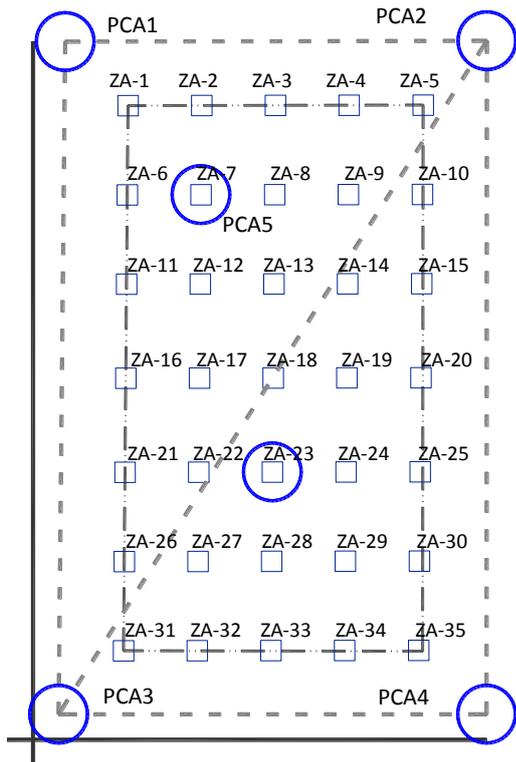


Figura 8: Representación gráfica en planta de la ubicación de treinta y cinco zapatas aisladas.

En el presente estudio queda implícito que concuerden las soluciones analíticas y se exhiban las propiedades de convergencia a partir de las coordenadas iniciales de la discretización (GEBS 1, GEBS 2) = (Φ_1, Φ_2) .

2.3.2. Ubicación UTM de los PCA en las ZA

Las condiciones de contorno o iniciales, (PCA 3 – PCA 2 – PCA 1) y (PCA 4 – PCA 2 – PCA 3), crean las funciones de contorno (FC) para interpolar las CS en cada una de las ubicaciones de las treinta y cinco zapatas aisladas (ZA) (Poenaru, 2016). En la Tabla 4 se observa un listado de coordenadas UTM, variables utilizadas en las FI. Dichas coordenadas son las ubicaciones de las zapatas aisladas que se desplantarán en la zona de construcción. Nótese que la ubicación de la zapata 7 y 23, corresponde con la exploración de PCA 5 y PCA 6 correspondientemente, por lo tanto, las CS se determinan, por una parte, en la exploración de los PCA y, por otra parte, aplicando en MEF, a partir de las FC, interpolando las FF en cada espacio discretizado GEBS 1 y GEBS 2.

3. Resultados y discusión

Al aplicar el MEF se determinó una función de interpolación para cada ubicación de las zapatas aisladas de la zona de construcción, con la información de la Figura 5. Además, se determinaron las resistencias del suelo interpolando las coordenadas de la Tabla 4; se utilizaron las constantes de la Tabla 2 en las funciones de forma constituidas por las condiciones de frontera del espacio discretizado, mediante los datos de la Tabla 1. Los resultados se graficaron como se observa en la Figura 9, de acuerdo con la profundidad (Df) de los estratos en estudio, así como con la ubicación de las zapatas aisladas (Figura 10).

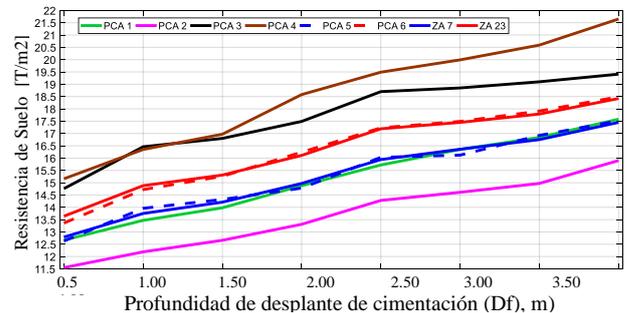


Figura 9: Representación gráfica de la información de resistencia de suelos determinada por medio del MT y el MEF

Se observó en la Figura 9 que las líneas punteadas corresponden con los PCA determinados en sondeos de campo. Las líneas continuas son los valores obtenidos por interpolación. El PCA tradicional vs el PCA interpolado varían en apenas un 2% respecto a su valor, lo que representa un 98% de aproximación en los resultados obtenidos.

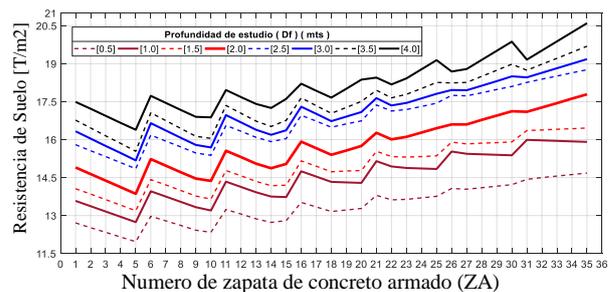


Figura 10: Representación gráfica de la Interpolación de resistencia de suelos aplicando MEF

En la figura 10 se observa que la línea roja continua representa el desplante de las 35 zapatas aisladas a 2 mts de profundidad realizando mejoramientos de terreno menores a 50 cm, cuando la resistencia de suelo se encuentra en 15 (t/m²), lo que representa la disminución del 30% de asentamientos diferenciales por compactación en suelos no explorados.

Se observó que a partir de la exploración de cuatro PCA se puede obtener la resistencia de suelo en las ubicaciones de las zapatas aisladas de la zona edificable, a partir de las funciones de geometría e interpolación, aplicando el MEF. Así mismo, se identifica de forma más certera, el nivel de desplante de la cimentación, considerando que el diseño estructural contara con una mayor cantidad de datos. Por tanto, el proyectista cuenta con la información suficiente para tomar la mejor decisión en cuanto a dimensiones y características de la superficie de sustentación de la construcción.

4. Conclusión

La aplicación del MEF demuestra excelente similitud en los resultados de las funciones de forma utilizadas como condiciones de contorno, en comparación con los datos de laboratorio determinados en los PCA explorados. En este trabajo de investigación se realizó la interpolación de Lagrange en la prospección de las resistencias de suelo en un predio. La obtención de resultados implementando esta metodología concluye con las ventajas siguientes:

1. La información de la resistencia de suelo con datos cuyos límites muestran la profundidad de desplante de la cimentación, generan información útil para el diseño de la geometría de las zapatas aisladas.
2. La simulación realizada en Matlab presenta resultados significativos al momento de evaluarlos, debido a que muestran el cálculo de las resistencias de suelos del MEF congruentes en un 98% con lo esperado en el MT.
3. Basándose en la metodología y los resultados obtenidos, es de gran importancia conocer las características del suelo donde se construyen las zapatas, respecto a disminuir asentamientos diferenciales que provoquen la iniciación del límite de servicio.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por su apoyo.

Referencias

- Argumedo, A. K. (2016). Análisis de estabilidad de taludes mediante elementos finitos estocásticos en yacimiento Fénix Slope stability analysis at Fenix open pit mine using stochastic finite elements.
- Chheng, C., & Likitlersuang, S. (2018). Underground excavation behaviour in Bangkok using three-dimensional finite element method. *Computers and Geotechnics*, 95, 68–81. <https://doi.org/10.1016/J.COMPGEO.2017.09.016>
- Charlton, T. J. (2017). iGIMP : An implicit generalised interpolation material point method for large deformations. *Computers and Structures*, 190, 108–125. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.05.004>
- Cueto, O. G. (2012). Modelo en elementos finitos de la interacción neumático-suelo Resumen Introducción, (November 2017).
- Daniel H Cortés. (2004). Modelo de elementos finitos para el análisis lineal de un material poroelastico transversalmente isotropo, 45–56.
- Escolano-Sánchez, F. (2015). Análisis comparativo entre el método por elementos finitos (FEM) y el método clásico (MC) en la estimación de asentamientos y cálculo del coeficiente de balasto para el diseño de losas de cimentación en zonas afectadas por cavidades naturales o antrópicas, 67(537), 2–7.
- Escudero, M. A. G. (2010). Análisis y diseño estructural de la cimentación y torre de soporte del gran telescopio milimétrico, (136).
- González-cueto, O. (2013). Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos, 22(3), 75–80.
- Lü, Q., Sun, H. Y., & Low, B. K. (2011). Reliability analysis of ground-support interaction in circular tunnels using the response surface method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(8), 1329–1343.
- Palomino-tamayo, J. L. (2017). Aplicación de campos estocásticos en problemas de geotecnia Application of stochastic fields in geotechnical problems, 16(2), 185–195.
- Pineda-Contreras A.R. (2013). Método del elemento finito estocástico en geotecnia . Enfoque espectral Stochastic Finite Element Method in Geotechnical Engineering . Spectral Approach.
- Poenaru, A. (2016). Correlations between cone penetration test and seismic dilatometer Marchetti test with common laboratory investigations, 85(November 2015), 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.219>
- Romano, M. (2016). Factor Escala UTM, 2.
- Shanpo, J. (2012). Numerical Solution to Identification Problems of Material Parameters in Geotechnical Engineering, 28(2011), 61–65. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.683>
- Vu-hoang, T. (2018). Bubble-enhanced quadrilateral finite element formulation for nonlinear analysis of geotechnical problems. *Underground Space*, 3(3), 229–242. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.01.007>
- Wobbes, E. (2017). Modeling of liquefaction using two-phase FEM with UBC3D-PLM model. *Procedia Engineering*, 175, 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.043>
- Zugic, Z. (2018). Geotechnical aspects on seismic retrofit. *Procedia Structural Integrity*, 13, 410–414. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.068>