

# Modelado numérico de las pilas tipo barrettes en condiciones del subsuelo de la zona del lago de la Ciudad de México

José-Luis RANGEL N. <sup>a,1</sup>, Enrique IBARRA R. <sup>b</sup> y Ricardo FLORES E. <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidad Autónoma Metropolitana, Plantel Azcapotzalco

<sup>b</sup> Ingeum Ingeniería, SA de CV

**Resumen.** Se estudia la capacidad de los modelos de elemento finito con mallas axisimétricas para representar el trabajo de los barrettes, para el caso de los depósitos de la zona lacustre centro de la CDMX. Para ello se comparan los resultados de los modelos numéricos axisimétricos con los tridimensionales, utilizando dos estrategias de equivalencia: a partir del área del fuste o de la punta de los barrettes. Los resultados indican que al inicio del trabajo del barrette, que es principalmente por fuste, la estrategia que más se aproxima al modelo 3D es cuando se establece la equivalencia del modelo axisimétrico por punta, pero a partir del inicio del trabajo por punta del barrette, la equivalencia que mejor aproxima es por fuste, siempre que la relación  $B/L < 3$ . En general, desde el punto de vista de la capacidad de carga total, la estrategia de equivalencia que más se aproxima a la capacidad del barrette es por fuste, sin embargo, este criterio sobreestima las capacidades de carga.

**Keywords.** Bored piles, side shear resistance, load test and numerical modeling.

## 1. Introducción

Actualmente, la solución de cimentación de los edificios altos ubicados en la zona lacustre de la ciudad de México (CDMX) es mediante barrettes de longitudes mayores a los 40m, debido a diferentes factores, de los que resaltan dos: los depósitos superficiales son de alta compresibilidad y de poca resistencia para soportar las descargas de los edificios y porque las pilas circulares son imprácticas y costosas cuando tienen que transmitir las grandes descargas de los edificios a profundidades importantes donde se encuentran los depósitos más resistentes. Por tanto, la opción de emplear barrettes es inmediata dado su capacidad de soportar carga elevadas derivada de su alta superficie específica, además de que el equipo que se emplea para su construcción es el mismo que se utiliza para construir los muros de soporte de las excavaciones de los sótanos, así como satisfacer razonablemente las normativas ambientales.

El concepto de barrette es un término francés utilizado para pilas de sección rectangular construidas en el lugar, excavando el suelo con o sin empleo de lodos bentoníticos o polímeros, dependiendo las condiciones de estabilidad de dicha excavación, para posteriormente introducir el armado y colocar el concreto fluido con

---

<sup>1</sup> José-Luis Rangel-Núñez, Universidad Autónoma Metropolitana, Plantel Azcapotzalco, Geotecnia c2, Av San Pablo Xalpa 180, Reynosa Tamaulipas, 02200 CDMX, México; E-mail: jrangeln62@gmail.com

tubo tremie, empleando la maquinaria utilizada para la construcción de los muros colados en el lugar.

*Problemática.* Debido a la forma rectangular de la sección transversal del barrette, su análisis y diseño geotécnico no es inmediato ya que las soluciones convencionales se refieren a elementos de sección circular o cuadrada, por lo que es necesario recurrir al modelado numérico tridimensional donde se tome en cuenta tanto las condiciones del subsuelo como las del barrette de la manera más aproximada a la realidad. Sin embargo, llevar a cabo un modelo numérico 3D de un barrette requiere de importantes recursos de cómputo y de tiempo de análisis, por lo que en la práctica de la ingeniería de cimentaciones se emplean modelos axisimétricos, utilizando dos estrategias para llevar a cabo la equivalencia: la primera considera la equivalencia en el área del fuste del barrette mientras que la segunda se realiza con respecto al área de la punta del barrette. Es válido suponer que en los barrettes donde el trabajo de la punta es más importante que el del fuste, la estrategia de equivalencia con respecto al área de la base del barrette es más adecuada, y contrariamente, cuando el trabajo por fuste es el primordial, el modelo basado en el área del fuste es lo recomendable. Sin embargo, para el caso de barrettes de gran longitud, es decir, mayores a los 40m, en la realidad los elementos cruzan una diversidad de condiciones del subsuelo, y para el caso donde los barrettes se ubican en las condiciones estratigráficas de la zona lacustre centro de la CDMX, donde existen depósitos muy suaves en los primeros 35m de profundidad y posteriormente se encuentran estratos duros, es difícil definir si el trabajo principal del barrette será por punta o fuste. Asimismo, se ha observado en pruebas de carga realizadas en pilas circulares profundas [1], que para estas condiciones estratigráficas de la zona lacustre centro de la CDMX, ambas condiciones de trabajo tienen importancia similar.

*Objetivo.* Se estudia la capacidad de los modelos de elemento finito con mallas axisimétricas para representar el trabajo de los barrettes, para el caso de los depósitos de la zona lacustre centro de la CDMX. Para ello se comparan los resultados de los modelos numéricos axisimétricos con los tridimensionales, utilizando dos estrategias de equivalencia: a partir del área del fuste o de la punta de los barrettes.

## 2. Modelado numérico del barrette y pila

Las investigaciones sobre el modelo numérico aplicado al análisis y diseño de pilas, y en especial de los barrettes, no es un tema nada nuevo. En efecto, entre los estudios recientes del modelado basado en pruebas de carga destacan los de Fellenius *et al.* [2, 3], Siew *et al.* [4], y en especial los de Wehnert y Vermeer [5]. En el presente trabajo se emplea de manera general la estrategia de modelado planteado por Wehnert y Vermeer, donde se puntualiza la importancia de aplicar modelos constitutivos avanzados, como del tipo de Masing (Hardening soil, HS) y los de suelos blandos (soft soil, SS), así como el empleo de los elementos de interfaz para modelar la interacción suelo-estructura, en donde se reduce su resistencia al esfuerzo cortante por el factor  $R_{inter}$ , de acuerdo con [6]:

$$c_i = R_{inter} * c_{suelo} \quad (1)$$

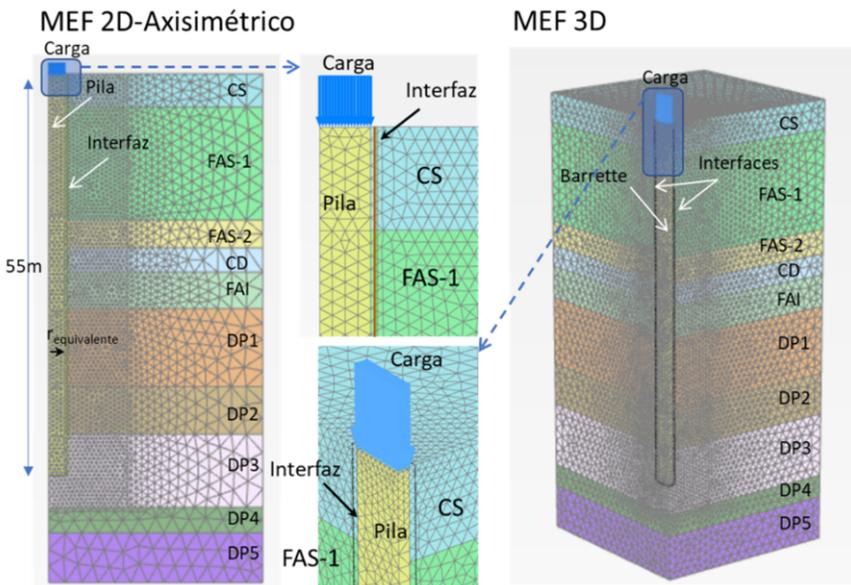
$$\tan \phi_i = R_{inter} * \tan \phi_{suelo} \quad (2)$$

Si bien, en [5] se recomienda utilizar un factor  $R_{inter}=1$ , es decir, que casi no hay alteración de la resistencia cortante en la zona de la interfaz, con base en pruebas de carga

realizadas en los suelos de la CDMX, se ha observado que este factor es cercano a la unidad para pilotes y pilas de poca longitud (menor de 30m) en los suelos suaves; sin embargo, para pilas profundas este factor varía entre 0.2 y 0.3 [1], debido principalmente a la alteración del suelo que se genera por el tiempo de exposición del suelo al lodo bentonítico [7].

Como se comentó previamente, los modelos desarrollados en este trabajo se dirigen a estudiar la aproximación del modelo numérico con una malla axisimétrica con relación a un modelo de barrette donde la malla es tridimensional. En efecto, dado el gasto requerido en tiempo y de computo para elaborar los modelos tridimensionales, en la ingeniería práctica se aproxima un barrette mediante una pila circular representativa del barrette, teniéndose para ello dos aproximaciones: llevar a cabo la equivalencia conservando el área transversal del fuste, lo que conlleva a una reducción del área de la punta, o respetar el área de la punta y modificando el área del fuste.

*Descripción del modelo.* Se emplea el Método de Elementos Finitos (MEF) siguiendo dos estrategias de análisis: un modelo bidimensional axisimétrico (MEF 2D-A) y otro tridimensional (MEF 3D), ambos bajo el cascarón de PLAXIS. Tanto el subsuelo como el barrette se representan con elementos sólidos triangulares de 15 nodos para el análisis MEF 2D-A y elementos de 10 nodos para el MEF 3D. En la Figura 1 se presentan ejemplos de las mallas empleadas para los análisis de MEF2D-A y MEF 3D, donde destacan los elementos de interfaz, que fueron utilizados para modelar el contacto pila o barrette con el suelo, donde se considera la alteración inducida en el terreno durante el proceso constructivo de los elementos de la cimentación.



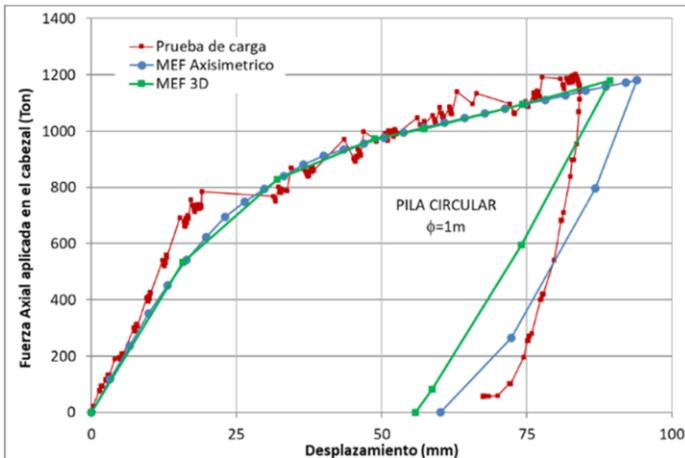
**Figura 1.** Modelos numéricos de elementos finitos del tipo axisimétrico y tridimensional empleados en los análisis del barrette.

El análisis numérico del barrette o de la pila se realiza por etapas, siendo estas: i) determinación de las condiciones iniciales del modelo, ii) excavación de la cimentación empleando como estructura de soporte a un lodo bentonítico, iii) construcción de la pila o barrette, iv) aplicación de la carga en el cabezal del barrette y v) descarga del barrette.

**Estratigrafía.** El perfil estratigráfico que se emplea en los modelos numéricos del barrette es representativo de la zona lacustre centro de la CDMX, en su porción centro-poniente, justo donde se han construido y se están construyendo edificios con este tipo de cimentación profunda. Esta estratigrafía se caracteriza por presentar suelos muy blandos en la parte superior (secuencia de limos y arcillas de alta plasticidad) y duros en la inferior (tobas volcánicas redepositadas y depósitos aluviales). En la tabla 1 se presenta el perfil estratigráfico cuyos parámetros mecánicos fueron determinados en función del modelo constitutivo del tipo Masing con endurecimiento (HSSsmall, del programa PLAXIS). En síntesis, se tiene: una costra superficial (CS, entre 0 y 4.6m); la formación arcillosa-limosa superior (FAS, entre 4.6 y 24); la capa dura (CD, entre 24.1m y 27.46m), y la formación arcillosa-limosa inferior (FAI, entre 27.46m y 32.5m). Finalmente, a partir de 32.5m y hasta la profundidad explorada, 70m, se encuentran los depósitos profundos (DP) constituidos por tobas, con un estrato arcilloso entre 60m y 63.55m.

**Tabla 1.** Modelo geotécnico.

Unidad Geotécnica	Sub Estrato	Profundidad (m)		$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	Ko	$\nu$	$E_{30}^{ref}$ (kPa)	$E_{oed}^{ref}$ (kPa)	$E_{ur}^{ref}$ (kPa)	m	$\frac{C_{ref}}{C_{ref}}$ (kPa)	$\phi^1$ (°)	$R_{inter}$	$\gamma_{0.7}$	$G_o^{ref}$ (kPa)
		de	a												
Costra superficial	CS	0.0	4.6	15.0	0.50	0.35	8,077	8,077	24,231	0.5	50.0	0.0	0.39	1.E-04	61,000
Formación arcillosa superior	FAS1	4.6	20.2	12.3	0.60	0.45	7,524	9,765	21,762	1.0	61.0	0.0	0.31	1.E-03	17,437
	FAS2	20.2	24.1	14.2	0.60	0.45	24,282	32,687	72,846	1.0	90.0	0.0	0.21	1.E-03	58,370
Capa dura	CD	24.1	27.5	16.0	0.60	0.30	37,643	46,300	112,929	0.5	122.0	18.2	0.31	1.E-04	90,488
Formación arcillosa inferior	FAI	27.5	32.5	14.9	0.60	0.30	18,279	24,606	54,837	1.0	135.0	0.0	0.20	9.E-04	43,940
Depósitos profundos	DP1	32.5	43.3	16.0	0.53	0.40	73,963	99,565	221,889	0.5	10.0	32.4	0.20	1.E-04	177,795
	DP2	43.3	49.9	16.0	0.66	0.40	50,254	67,649	150,762	0.5	327.0	0.0	0.20	9.E-04	120,802
	DP3	49.9	60.0	16.0	0.54	0.30	89,100	118,190	267,300	0.5	216.0	25.8	0.30	1.E-04	214,207
	DP4	60.0	63.6	15.6	0.65	0.40	56,000	75,382	167,994	0.5	198.0	20.7	0.18	9.E-04	134,611
	DP5	63.6	70.5	17.0	0.50	0.35	61,300	82,519	183,900	0.5	10.0	37.5	0.14	1.E-04	147,356



**Figura 2.** Curvas carga-desplazamiento obtenidas de la prueba de carga y de los modelos numéricos MEF 2D-A y MEF 3D.

**Calibración.** A fin de verificar la veracidad del modelo numérico empleado para el barrette se llevó a cabo su calibración empleando una prueba de carga realizada en la estratigrafía antes descrita. La prueba de carga consistió de una pila de sección circular

de 1m de diámetro con 55m de longitud. La excavación se realizó con barril utilizando lodo bentonítico como fluido de soporte de la excavación, posteriormente se colocó el armado y se procedió el colado de la pila mediante tubo tremie. En la Figura 2 se presentan las curvas carga-desplazamiento en el el cabezal de la pile/barrette, obtenidas de la prueba de carga y de los modelos numéricos MEF 2D-A y MEF 3D. Como se observa, la aproximación obtenida con los modelos numéricos es adecuada.

### 3. Resultados

Con base en los modelos numéricos del barrette descritos previamente, es decir, el axisimétrico, MEF 2D-A, y el tridimensional, MEF 3D, y considerando la estratigrafía descrita previamente, se determinan las curvas carga-desplazamientos para distintos valores de la relación  $B/L$  del barrette, siendo  $L$  y  $B$  el largo y ancho del barrette, a fin de valorar la representación del modelo MEF 2D-A, a partir de los resultados del MEF 3D, siguiendo dos estrategias: cuando la pila circular conserva la misma área del fuste del barrette, o cuando se mantiene la misma área de la punta. El intervalo de variación de la geometría normalizada es de  $0.5 \leq L/B \leq 2$ .

En la Figura 3 se presentan las características de las geometrías de barretes y pilas equivalentes analizadas, así como la variación de los diámetros ( $\phi_{equivalente}$ ) y volúmenes ( $V_{pila_f}$  y  $V_{pila_p}$ ) de las pilas equivalentes y el volumen del barrette ( $V_{barrette}$ ) con respecto al parámetro  $B/L$ .

Se observa que al incrementarse el valor de  $B/L$ , el radio equivalente de la pila que se aproxima al barrette empleando el área del fuste se incrementa linealmente y de manera exponencial su volumen, siendo casi el doble del volumen del barrette para el caso de  $B/L=5$ .

Cuando la pila cuyo criterio de equivalencia con el barrette es el área de la base, su radio equivalente también se incrementa al subir el valor del cociente  $B/L$ , pero en menor proporción que el caso anterior, y el volumen es siempre igual al del barrette.

Barrette (Longitud 55m)									Pila (Equivalente en fuste)							Pila (Equivalente en punta)						
B	L	B/L	A <sub>f</sub>	A <sub>b</sub>	V <sub>barrette</sub>	Q <sub>f</sub>	Q <sub>p</sub>	Q <sub>t</sub>	φ <sub>equivalente</sub>	A <sub>f</sub>	A <sub>b</sub>	V <sub>pila_f</sub>	Q <sub>f</sub>	Q <sub>p</sub>	Q <sub>t</sub>	φ <sub>equivalente</sub>	A <sub>f</sub>	A <sub>b</sub>	V <sub>pila_p</sub>	Q <sub>f</sub>	Q <sub>p</sub>	Q <sub>t</sub>
(m)	(m)	(-)	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(ton)	(ton)	(ton)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(ton)	(ton)	(ton)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(ton)	(ton)	(ton)
0.6	1.2	0.5	198.0	0.72	39.6	800	950	1,750	1.15	198.0	1.03	56.7	900	1,000	1,900	0.96	165.4	0.72	39.6	700	900	1,600
1.2	1.2	1.0	264.0	1.44	79.2	1,050	1,450	2,500	1.53	264.0	1.83	100.8	1,200	1,250	2,450	1.35	234.0	1.44	79.2	1,100	1,050	2,150
2.8	1.2	2.3	440.0	3.36	184.8	1,900	3,200	5,100	2.55	440.0	5.09	280.1	2,300	3,300	5,600	2.07	357.4	3.36	184.8	1,700	2,500	4,200
6.0	1.2	5.0	792.0	7.20	396.0	3,440	4,960	8,400	4.58	792.0	16.50	907.6	4,100	6,400	10,500	3.03	523.2	7.20	396.0	3,200	4,800	8,000

Símbolos: B y L: Ancho y largo de la sección transversal del barrette; V<sub>barrette</sub>, V<sub>pila\_f</sub> y V<sub>pila\_p</sub>, los volúmenes del barrette, y pilas equivalentes respecto al fuste y la punta del barrette, respectivamente; A<sub>f</sub> y A<sub>b</sub> áreas del fuste y punta del elemento; y Q<sub>f</sub>, Q<sub>p</sub> y Q<sub>t</sub>, capacidades de carga por fuste, punta y total del elemento determinadas con los modelos numéricos.

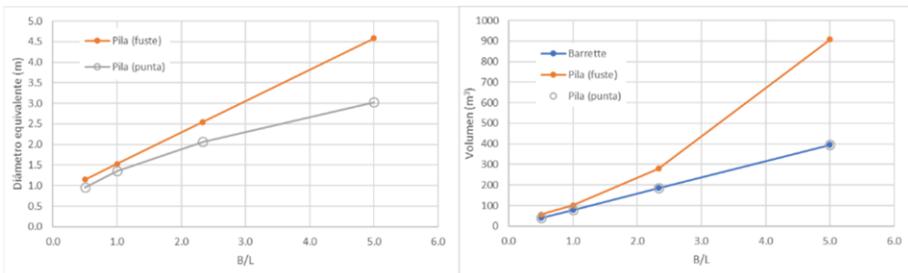
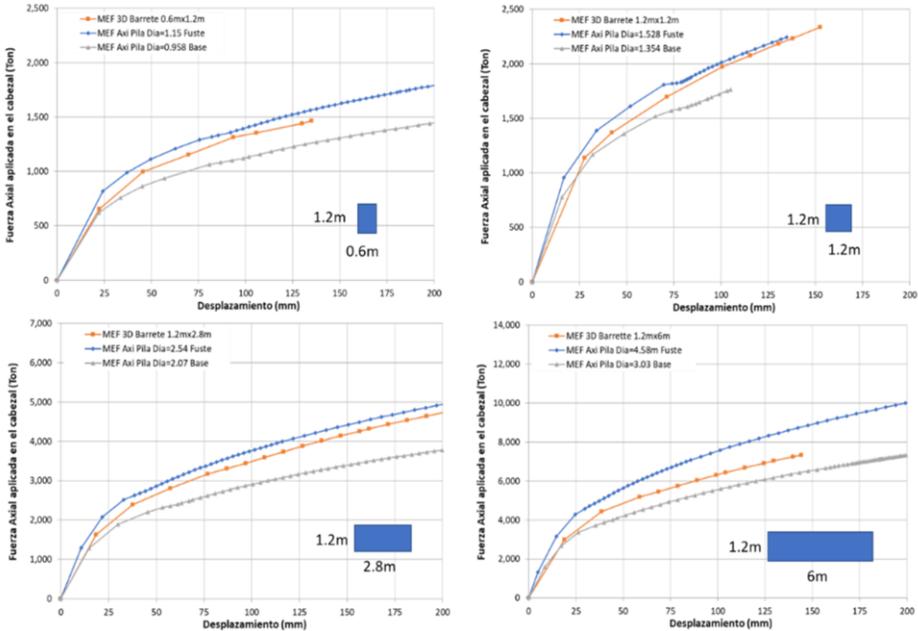


Figura 3. Variación del diámetro equivalente y del volumen de las pilas equivalentes (fuste o base) y el barrette con respecto a  $B/L$ .

En la Figura 4 se presentan las curvas carga-desplazamiento obtenidas con ambos modelos axisimétricos equivalentes, y en la Figura 5, se presentan las capacidades de carga tanto de las pilas equivalentes como del barrette propiamente. Al respecto se tienen los comentarios siguientes:



**Figura 4.** Curvas carga-desplazamiento para el intervalo de valores de  $0.5 \leq B/L \leq 2$ , determinadas con los modelos MEF 2D-A y MEF.

- En la Figura 4 se aprecia que la curva fuerza axial aplicada en el cabezal *versus* desplazamiento del barrette siempre se ubica entre las curvas de las pilas equivalentes. En general, al inicio de la curva y durante todo el trayecto donde el trabajo del barrette es primordialmente por fuste, la curva de la pila con equivalencia por punta es muy semejante a la del barrette, pero cuando el trabajo del barrette es fundamentalmente por punta, el comportamiento de la curva del barrette tiende a asemejarse al de la pila con equivalente en el fuste.
- Si bien en general la curva fuerza-desplazamiento del barrette se asemeja al de la pila con equivalencia por fuste, a medida que la relación  $B/L$  crece, la curva del barrette tiende al de la curva de la pila equivalente por punta.
- La capacidad de carga por fuste de la pila equivalente en punta se asemeja más a la del fuste del barrette.
- Cuando el cociente  $B/L < 3$ , la capacidad de carga total de la pila con equivalencia por fuste se aproxima más a la del barrette, pero para valores de  $B/L > 3$  sucede lo contrario, la pila con equivalencia en la punta es más aproximada en la carga total del barrette. Es decir, que a medida que el barrette tiende a ser un muro, la capacidad por punta es más importante desde el punto de vista de la capacidad de carga total.

- Dado que la curva de la pila equivalente por fuste se aproxima más a la del barrette para las dimensiones comunes de los barretes  $B/L < 4$ , desde el punto de vista de diseño, esta estrategia de equivalencia sería la mejor; sin embargo, se obtendrían capacidades de carga mayores a la del barrette, lo que es inadecuado.
- Los resultados numéricos confirman que el trabajo del barrette es más eficiente que el de una pila de sección circular, dado que la pila equivalente que más se aproxima al barrette es la del fuste, pero su volumen es mucho mayor al del barrette. En efecto, con un menor volumen de concreto y de excavación se obtienen con el barrette capacidades semejantes al de una pila equivalente.

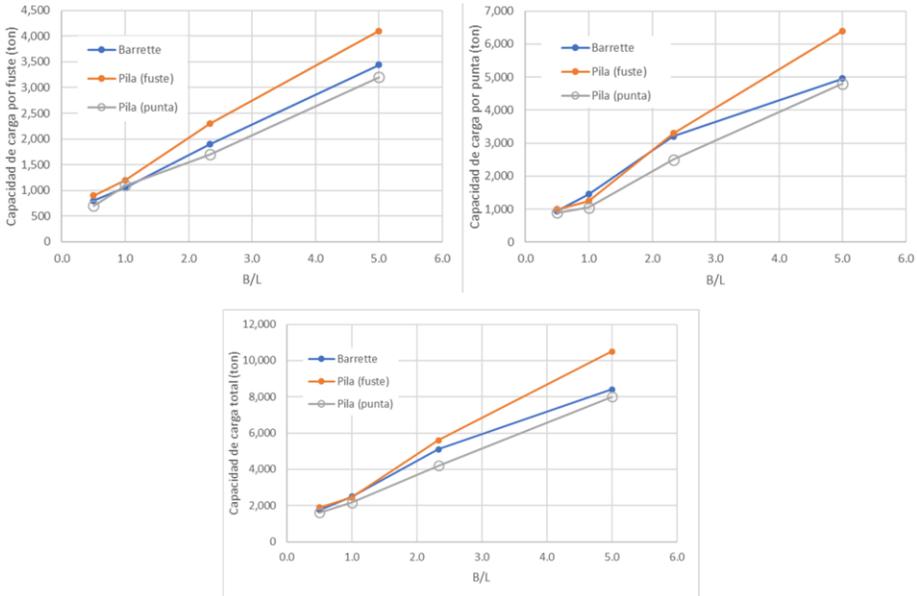


Figura 5. Capacidades de carga por fuste, punta y total de las pilas equivalentes y los barretes con respecto al cociente  $B/L$ .

#### 4. Conclusiones

Se estudia la capacidad para representar el trabajo de un barrette profundo con modelos de elementos finitos del tipo axisimétrico a partir de un modelo numérico del barrette tridimensional calibrado con una prueba de carga, en un perfil estratigráfico típico de la zona lacustre de la ciudad de México, empleando un modelo de ecuación constitutiva del tipo Masing con endurecimiento.

Los resultados de la calibración de los modelos de elementos finitos del tipo axisimétricos y tridimensionales fueron adecuados tanto en su trayectoria de carga como en descarga de la pila.

A partir de los modelos numéricos calibrados se estudian dos estrategias para representar un barrette con modelos numéricos del tipo axisimétrico: una basada en establecer la equivalencia en términos del área del fuste del barrette y la segunda con respecto al área de la punta.

Los resultados indican que al inicio del trabajo del barrette por fuste la estrategia que más se aproxima es cuando se establece la equivalencia por punta, pero a partir del inicio del trabajo por punta del barrette, la equivalencia que mejor aproxima el comportamiento es por fuste siempre que la relación  $B/L < 3$ .

Debido a que la curva de la pila equivalente por fuste, así como su capacidad de carga total, se aproximan más a la del barrette, para las dimensiones comunes de los barrettes  $B/L < 4$ , desde el punto de vista de diseño, esta estrategia de equivalencia sería la mejor; sin embargo, las capacidades de carga obtenidas tenderán a ser ligeramente mayores, lo cual no es recomendable.

Los resultados numéricos confirman que el trabajo del barrette es más eficiente que el de una pila de sección circular, dado que la pila equivalente que más se aproxima al barrette es la del fuste, pero su volumen es mucho mayor al del barrette. En efecto, con un menor volumen de concreto y de excavación se obtienen con el barrette capacidades semejantes al de una pila equivalente.

## Referencias

- [1] Ibarra-Razo E., Rangel-Núñez J.L., Holguín E. y Flores-Eslava R (2018), "Development of side friction on long bored piles cast in place on layered soils", XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica Nov 23 y 24, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, León, México.
- [2] Fellenius B.H., Altaee A., Kulesza R. and Hayes J. (1999), "O-cell testing and FE analysis of 28m deep barrette in Manila, Philippines, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, July, 125(7):566-575.
- [3] Siew A. T., Fellenius B.H. (2012), "Failure of a barrette as revealed in a bidirectional test", Full-Scale testing in foundation design, Hussein et al eds, Geotechnical Special publication 227, ASCE GeoCongress Oakland March 25-29: pp 307-321.
- [4] AbdelMohsen H., ElWakil A., and Saad A. (2011), "Numerical simulation of pile load test", Proc. 17th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Eng., M. Hamza et al Eds., doi 10.3233/978-1-60750-031-5-3465.
- [5] Wehnert M. & Vermeer P.A. (2004), "Numerical analyses of load test on bored piles", NUMOG 9th, 25-27 August, Ottawa, Canada.
- [6] Brinkgreve R. and Vermeer P.A. (1998), Plaxis version 7. Rotterdam: A.A. Balkema.
- [7] Lam C., Jefferis S.A., and Martin C.M. (2014), "Effects of polymer and bentonite support fluids on concrete-sand interface shear strength", Géotechnique 64, No. 1, 28-39.