

## Fundaciones Combinadas de Platea y Pilotaje

Roberto O. Cudmani<sup>1</sup>

*rcudmani@arnet.com.ar*

### Resumen

Fundaciones constituidas por una combinación de platea con pilotes constituyen una alternativa respecto a las fundaciones puramente superficiales o profundas. A pesar de que esta variante viene usándose en nuestro medio con cierta frecuencia, en la mayoría de los casos su proyecto se apoya en la intuición y experiencia del ingeniero más que en un análisis debidamente fundamentado. Se trata de un tema que en las últimas décadas ha captado el interés de los ingenieros, geotécnicos y estructuralistas, habiéndose generado un considerable avance en el entendimiento del comportamiento del suelo y su interacción con los elementos que conforman tales fundaciones.

En esta contribución, el autor presenta una síntesis de los más importantes conceptos involucrados en este tipo de fundación y de los diferentes enfoques para el análisis – simplificados o elaborados – que se han divulgado en los últimos años.

**Palabras Claves:** pilotes, platea, asentamiento, capacidad portante

### 1. Introducción

La estructuración de una fundación en base a la combinación de una platea superficial con pilotaje constituye un sistema constructivo caracterizado por la acción conjunta de ambos elementos – platea y

---

<sup>1</sup> Roberto O. Cudmani es Ingeniero en Construcciones e Ingeniero Civil, posgraduado con el Diplom of The Imperial College (Inglaterra). Fue becario de la Alexander von Humboldt Stiftung en tres ocasiones para realizar investigaciones en las Universidades de Munich y Karlsruhe (Alemania). Es Profesor Titular de la Universidad Católica de Salta y de la Universidad Nacional de Tucumán.

pilotes – con la función de transmitir al terreno las cargas de la superestructura que se ha de fundar.

En las últimas décadas son numerosas las investigaciones y desarrollos conceptuales que han conducido a mejorar el conocimiento del comportamiento conjunto de platea y pilotes, y que hacen de este sistema constructivo una alternativa de fundación asociada en general a edificios en altura fundados sobre suelos granulares y en particular sobre suelos arcillosos en estado normalmente consolidados - o mejor aún – sobreconsolidados. Independientemente del tipo de suelo, la aplicación del sistema platea-pilotes puede ser ventajosa cuando en una fundación basada sólo en pilotes el número de éstos aumenta y la distancia entre ellos se reduce. En una fundación profunda convencional, la capacidad portante de los pilotes en el grupo debe ser reducida cuando la distancia entre pilotes disminuye a valores menores que aproximadamente tres o cuatro veces su diámetro. La eficiencia del grupo de pilotes, que es el cociente entre la capacidad portante del pilote aislado y la del pilote en el grupo, puede alcanzar valores de hasta 0.7 para una distancia entre los pilotes de dos veces su diámetro. Ello implica un aumento de la longitud de los pilotes y por ende, de los costos de la fundación.

El análisis de la interacción entre los tres elementos – platea, pilotes y suelo – es de primordial importancia para la evaluación de los asentamientos del conjunto, sean uniformes o diferenciales. A su vez, una acertada predicción de los asentamientos es indispensable para verificar que los requerimientos en el estado de servicio se vean cumplidos. Resumidamente, la platea y los pilotes son responsables de transferir las cargas actuantes al terreno, activando la capacidad portante de las distintas capas de este último.

Además de conducir a la reducción de los asentamientos, pueden mencionarse efectos positivos adicionales de la combinación platea-pilotes - en adelante simbolizada mediante la sigla CPP – respecto a una platea de fundación única, a saber:

- Aumento de la capacidad portante de la fundación.
- Limitación de la descarga del suelo durante la ejecución de la excavación, debido a que los pilotes, que en esta etapa trabajan a tracción, previenen la liberación de tensiones en el mismo. Ello evita levantamientos excesivos de la base de la

excavación, y asentamientos fuera de la excavación asociados a los primeros.

- Reducción de las tensiones transmitidas al suelo a través de la platea de fundación mediante una adecuada elección del número y disposición de los pilotes.
- Mejora del comportamiento en servicio mediante la reducción de los asentamientos individuales o diferenciales. En otras palabras, la CPP actúa como un *freno de los asentamientos*.
- Reducción del riesgo de fallas o fisuras en elementos de la superestructura, en particular las fachadas de los edificios.
- Se asegura la estabilidad de la fundación completa, ya que la platea por sí sola no garantiza la estabilidad respecto a las cargas actuantes.
- Implementación de un bloque excéntrico que impide el volcamiento en el caso de cargas actuantes excéntricas, mediante un arreglo asimétrico de los pilotes.

Según la norma DIN 1054 (1987), el proyecto de una CPP se basaba en la idea de absorber la carga total mediante el pilotaje, despreciando la capacidad portante de la platea de fundación. Es evidente que tener en cuenta esta última colaboración conducirá a proyectos más económicos, posibilitando la disminución del número de pilotes y asegurando al mismo tiempo asentamientos dentro de límites tolerables.

A manera de ejemplo, se incluye en Fig.1 un diagrama cuantitativo presentado por Mossallamy (1996), que pone de manifiesto un probable incremento de la capacidad portante de una CPP en comparación con la platea o el pilotaje únicos, para un mismo asentamiento final de 100 mm. Puede observarse que los pilotes absorben alrededor de un 50% de la carga efectiva, y el resto es tomado por la platea.

A pesar que el comportamiento de la CPP está siendo seguido e investigado desde hace algunas décadas, el mecanismo de distribución de las cargas exteriores, como asimismo el comportamiento bajo carga-asentamiento, no son aún suficientemente discernidos, lo que debe atribuirse a la compleja interacción de sus elementos. En principio, el análisis de una CPP debe conducir a los siguientes resultados:

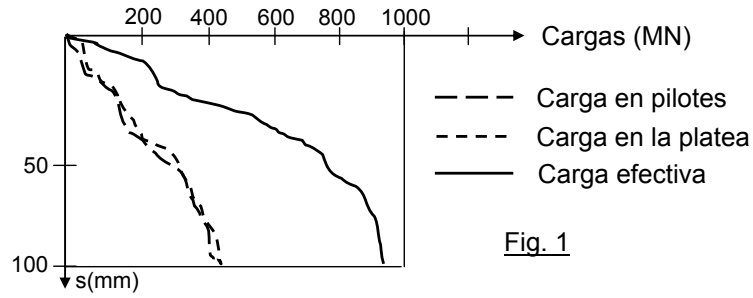


Fig. 1

- Los asentamientos máximos absolutos o diferenciales.
- La distribución de las cargas exteriores entre la placa y el pilotaje
- La repartición de la carga del pilotaje entre los diferentes pilotes.
- Las tensiones del suelo bajo la placa.

La Fig.2 muestra en forma cualitativa, siguiendo a Katzenbach (1993), la disminución de los asentamientos de una fundación con placa única cuando se adiciona el pilotaje.

Los factores más importantes que intervienen en el comportamiento carga-asentamiento de una CPP son:

- La interacción entre los pilotes de un grupo
- El efecto recíproco entre los pilotes y la placa

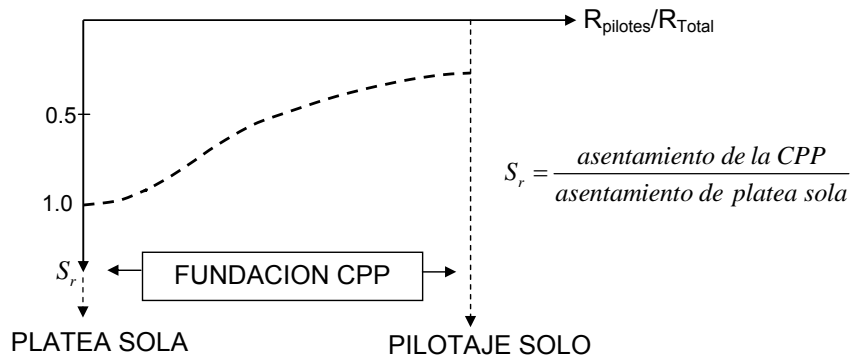


Fig. 2

La Fig. 3 representa esquemáticamente la relación carga-asentamiento de un pilote individual, de un pilote de un grupo y de una CPP. Las interacciones entre los pilotes de un grupo y de los pilotes con la platea conducen por una parte a la disminución la rigidez de los pilotes en relación a su comportamiento carga-asentamiento, y por otra parte aumentan su carga portante límite. Se trata de un hecho similar al de una fundación con platea, caso en que las fundaciones vecinas experimentan mayores asentamientos pero acusan mayor capacidad portante límite.

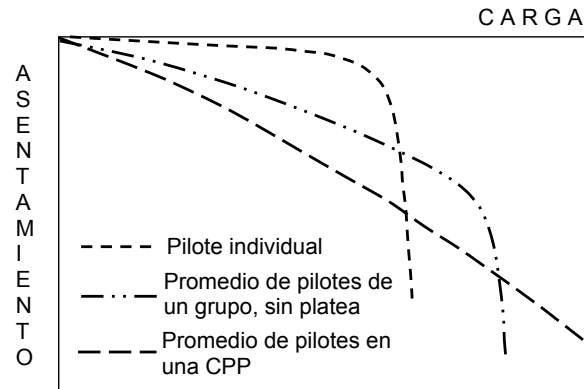
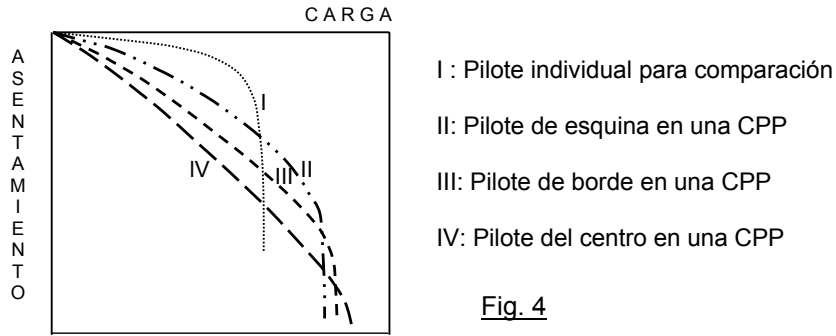


Fig. 3

La repartición de las cargas entre los pilotes de un grupo de una CPP no es en general constante y es función de la rigidez de la platea de fundación, de las dimensiones de los pilotes, de la configuración del grupo de pilotes y de la posición de cada pilote, como también de la magnitud y distribución de las cargas actuantes sobre la CPP y del suelo. En la Fig. 4 se presenta gráficamente una comparación de la carga en los distintos pilotes, referida al pilote individual. Como se observa en la misma, la capacidad portante límite promedio de los pilotes en una CPP – condicionada por las presiones del suelo bajo la platea – es mayor que en un pilote individual, hecho que fue verificado en mediciones realizadas in situ. Por otro lado, el desplazamiento requerido para movilizar una determinada resistencia es menor en el pilote individual que en los pilotes en una CPP.



## 2. Modo de Acción y Transferencia de la Carga Exterior

Como se observa en Fig. 5, la capacidad portante de una CPP está generada por la interacción mutua de platea, pilotes y suelo. Dicha interacción se presenta en cuatro formas distintas, que se comentarán en detalle más adelante:

- Entre la platea y el suelo
- Entre los pilotes y el suelo
- Entre la platea y los pilotes
- Entre cada pilote con los restantes pilotes del grupo

La platea de fundación, debido a su rigidez flexional, distribuye la totalidad de las cargas de la superestructura, una parte directamente al suelo a través de la integral  $R_{\text{platea}}$  de las tensiones  $\sigma(x,y)$ , y otra parte solicitando a los pilotes, que en base a su resistencia lateral y de punta colaboran en transmitir a capas más profundas del suelo dicha parte restante de la carga exterior, con la consiguiente disminución de los asentamientos.

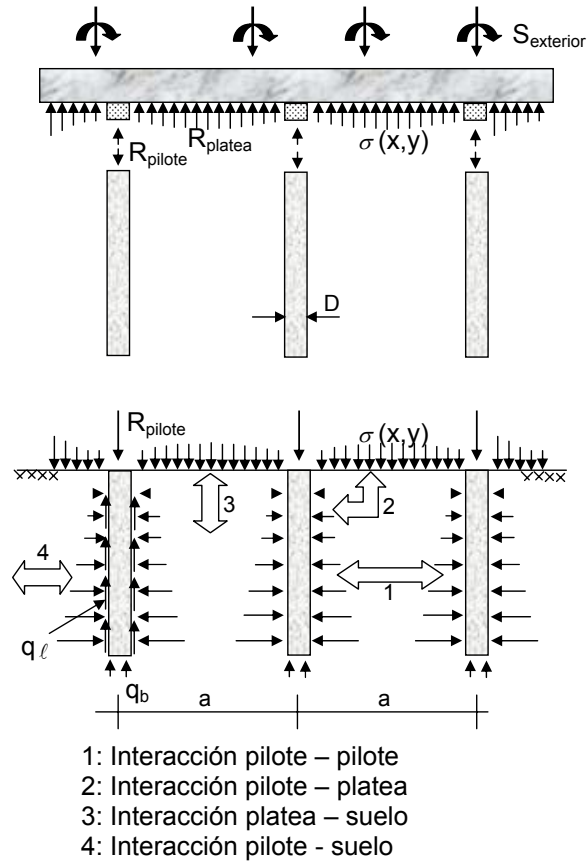


Fig. 5

Puede escribirse entonces:

$$S_{\text{exterior}} = R_{\text{total}} = \sum_{j=1}^n R_{\text{pilote},j} + R_{\text{platea}} \quad (1)$$

Denominando  $q^{\ell}(z)$  a la tensión de rozamiento entre la superficie lateral del pilote y el suelo a la altura  $z$  medida desde la superficie, la fuerza resultante que transmite cada pilote por resistencia lateral es:

$$R_{\ell} = \int q_{\ell}(z) \pi D dz \quad (2)$$

Y la resistencia de punta generada por el área de la base del pilote es:

$$R_b = 0.25 q_b \pi D^2 \quad (3)$$

Siendo  $q_b$  la presión ejercida por el pilote en su base. Por lo tanto:

$$R_{pilote,j} = R_{\ell,j} + R_{b,j} \quad (4)$$

El comportamiento de una CPP suele definirse en función de un coeficiente  $\alpha$ , que es la relación entre la fuerza absorbida por los pilotes y la fuerza total que absorbe la CPP:

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^n R_{pilote,j}}{R_{total}} = \frac{\sum_{j=1}^n R_{pilote,j}}{R_{platea} + \sum_{j=1}^n R_{pilote,j}} \quad (5)$$

Teóricamente, el valor de  $\alpha$  varía entre 0 y 1. El primer valor corresponde al caso que toda la carga sea absorbida por la platea y el último valor al caso que solo trabajen los pilotes. Por lo general, en una CPP,  $\alpha$  está comprendido entre **0.3** y **0.8**.

En la actualidad se cuenta con información suficiente para estimar el comportamiento de una CPP: seguimiento de obras ejecutadas, investigación en base a modelos de laboratorio, ensayos de campo, comparaciones analíticas y cálculos numéricos. Cabe señalar que el logro de un proyecto confiable y seguro de una CPP depende fundamentalmente del conocimiento del suelo de fundación, lo que se logra tanto en laboratorio como en el campo según la práctica geotécnica corriente.

La CPP es particularmente efectiva cuando la rigidez del suelo de fundación se incrementa con la profundidad, lo que se verifica a menudo en la práctica. En estos casos, gran parte de los asentamientos se producen en el tercio superior de la CPP, donde las presiones en el terreno son mayores (Fig. 6).

Los asentamientos de una CPP están representados por la integral de las tensiones en el terreno divididas por el módulo de rigidez del mismo. En la parte superior, inmediatamente bajo la platea, las tensiones en el suelo son altas y se dividen por un módulo



relativamente bajo, por lo cual en estas capas se verificará una buena parte de los asentamientos, Fig. 6, habiéndose verificado en algunos casos que en el tercio superior de la altura total se origina hasta un 70% de los asentamientos totales. Si a medida que se profundiza en el terreno aumenta el módulo de rigidez y se reducen las tensiones - lo cual es corriente en suelos cohesivos normalmente consolidados - se reducirán obviamente los asentamientos de la CPP.

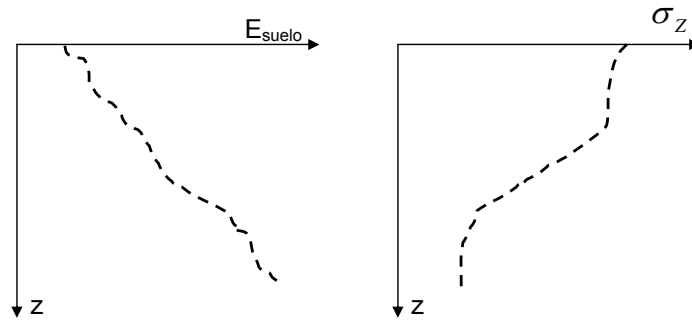
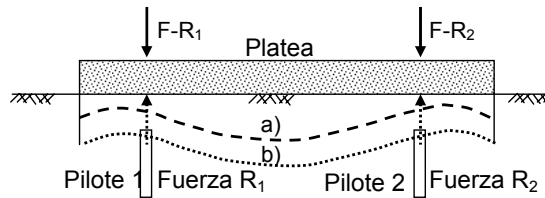


Fig. 6

Por mediciones efectuadas in situ, se conoce que el coeficiente  $\alpha$  varía durante la construcción y aumenta su valor a medida que tienen lugar los asentamientos. Ello hace más laboriosa la determinación de dicho coeficiente, no existiendo métodos estandarizados simples para dimensionar una fundación CPP. En las primeras aplicaciones de este tipo de fundación se solía considerar a los pilotes como apoyos de la platea, independientemente de los asentamientos, ubicando los mismos en correspondencia con las cargas exteriores. Como se indica en la Fig. 7, la platea de fundación resulta solicitada por las cargas exteriores  $F$  reducidas por las reacciones de ambos pilotes, con lo cual las tensiones del terreno sobre dicha platea se ven asimismo reducidas. Al no tener en cuenta los asentamientos, es obvio que este método implica una aproximación grosera.



- a) Presión de contacto en la placa con pilotes  
 b) Presión de contacto en la placa sin pilotes

Fig. 7

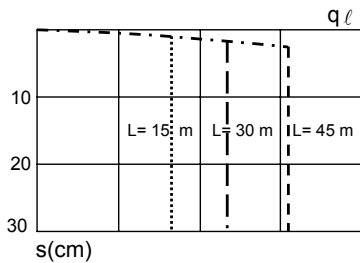
### 3. Interacción entre el Suelo y los Elementos de la CPP

Los problemas de interacción señalados en la Fig. 5 están particularmente ligados a los efectos del suelo sobre la CPP.

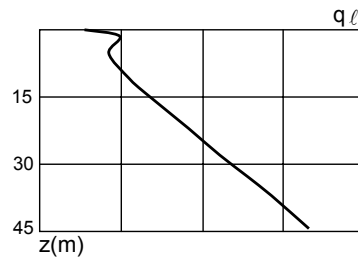
#### 3.1. Interacción del suelo sobre los pilotes

La resistencia lateral de los pilotes depende fundamentalmente de la resistencia al corte en la superficie de contacto entre el fuste y el suelo. Básicamente, bajo condiciones de carga lenta (drenadas), la resistencia lateral está determinada por la magnitud de las tensiones normales del suelo a lo largo del fuste y por el coeficiente de fricción entre el suelo y el material del pilote (acero, hormigón, madera). Si se trata de un único pilote, su comportamiento depende del estado de tensiones primario del suelo y de los cambios de tales tensiones durante y después de la construcción del pilote. Si ahora se analiza un pilote de una fundación CPP, la presencia de los pilotes vecinos y de la placa influyen adicionalmente el nivel de tensiones del suelo que rodea al pilote en cuestión, y por lo tanto el comportamiento del mismo.

Katzenbach et al. (2002) han analizado numéricamente la resistencia de fuste de tres pilotes iguales, pero de diferente longitud: 15, 30 y 45 metros, con diámetro  $D = 1.50$  m, en un suelo saturado de agua. Los resultados mostraron que con el aumento de la longitud se incrementa proporcionalmente la fricción lateral, Fig.8, lo cual debe atribuirse a que las tensiones propias del suelo aumentan linealmente con la profundidad, Fig.9. En consecuencia, puede inferirse que el uso de pilotes cortos provee un límite inferior para su resistencia, en comparación con el caso de pilotes largos.



**Fig. 8** Fricción lateral a lo largo del pilote en función del asentamiento



**Fig. 9** Aumento de la fricción lateral para  $s=0.1D$  en función de la profundidad

En otro estudio numérico realizado con dos pilotes de 30 m de largo y 1.5 m de diámetro, perforados en el mismo suelo anterior, uno desde la superficie y el otro a 20 metros de profundidad, se comprobó que el primero de ellos poseía una resistencia de fuste menor a la del más profundo, conclusión que ya era conocida de los ensayos de carga de pilotes. Las más altas tensiones normales del suelo sobre el pilote localizado a 20 m de profundidad conducen en este caso a una mayor capacidad portante del mismo.

Por lo general, la resistencia lateral no es activada en forma uniforme en toda la longitud de los pilotes, resultando una distribución de tensiones de corte no lineal. En el caso de una CPP, la resistencia lateral es máxima cerca de la punta del pilote y se activa más rápidamente, de manera que la resistencia lateral en esta región gobierna el diseño estructural de los mismos.

Finalmente, cabe acotar que los métodos de cálculo de una CPP basados en la curva resistencia-asentamiento de un pilote único resultan incorrectos y pueden conducir a una estimación de la resistencia del grupo de pilotes inferior a la real, debido a la interacción de los pilotes con la platea.

### **3.2. Interacción pilotes-platea**

La influencia del efecto recíproco entre pilotes y platea en el comportamiento de ambos elementos de una fundación CPP se estudió numéricamente en base a modelos simplificados, tal como el representado en la Fig.10. (Katzenbach et al, 2002)

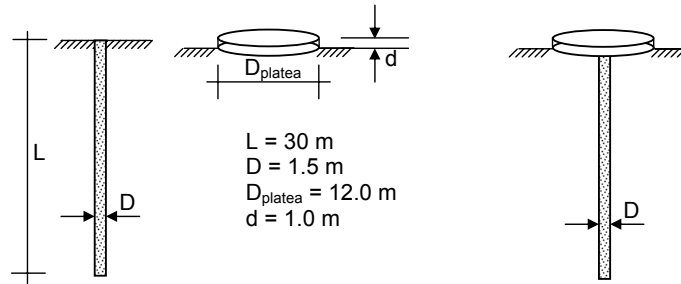


Fig. 10

Se trató en este modelo de una fundación CPP que consta de una platea circular y de un pilote único centrado con la platea, con las dimensiones indicadas en la figura.

En la Fig.11 se graficaron la fuerza normal y la fricción lateral a lo largo de la longitud del pilote en función de la profundidad, para tres valores de asentamientos en la cabeza del pilote:  $0.005 D$ ,  $0.01D$  y  $0.1 D$ , siendo  $D$  el diámetro del mismo. La generación de la fricción lateral a lo largo de un pilote individual se produce debido a los desplazamientos relativos entre el fuste elástico del pilote y el suelo circundante y por las tensiones primarias del suelo actuando sobre el mismo, las cuales crecen con la profundidad. Partiendo de la cabeza del pilote y con asentamientos crecientes, surge un efecto de corte en la superficie lateral del pilote, de manera que la fricción lateral puede llegar a ser movilizada hasta su valor límite, creciendo casi linealmente con la profundidad. Esta falla en la superficie lateral de un pilote, así determinada numéricamente, fue confirmada asimismo por Poulos y Davis (1980) en diversos ensayos de carga de pilotes individuales. Sin embargo, se determinó que en los pilotes de una CPP tales cortes no se producen a lo largo de los pilotes, y por lo tanto la resistencia lateral última no es movilizada.

En el pilote del modelo de Fig.10 la activación de la fricción lateral no se produce solamente por las tensiones primarias del suelo actuando sobre el mismo, sino también por la influencia de la carga transmitida al suelo por la platea, que aumenta el nivel de tensiones en el suelo. En efecto, el incremento de las tensiones verticales bajo la platea, que dependen de los asentamientos de la misma, genera un aumento considerable de las tensiones normales al fuste y por lo tanto de las tensiones de resistencia lateral del pilote. En el estudio numérico,

esta influencia de la platea se hace sentir hasta una profundidad de aproximadamente 1.5 veces su diámetro.

A su vez, la influencia del pilote afecta el comportamiento de la platea, de tal manera que se reducen las tensiones normales verticales bajo la misma, sobre todo en las cercanías del fuste, Fig.12.

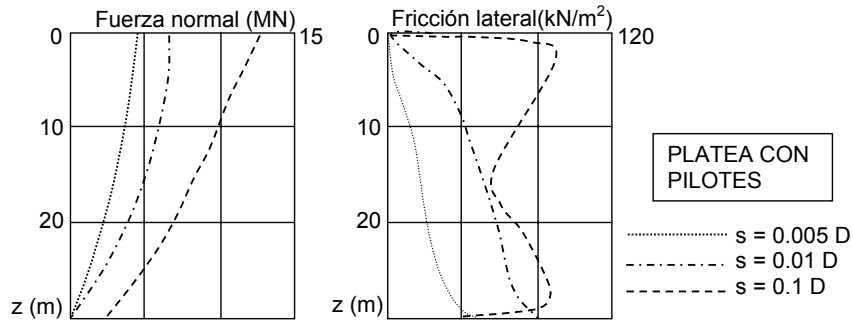


Fig.11

### 3.2.- Interacción pilotes-pilotes y pilotes-platea

El comportamiento de una fundación CPP es influenciado por la interacción pilotes-platea, pero además por la acción recíproca entre los pilotes del grupo. Esta interacción fue estudiada numéricamente por Katzenbach et al. (2002) en base a una comparación entre una fundación con platea única, una fundación con pilotes solamente y una fundación CPP. La investigación se basó en la fundación cuyos datos se presentan en Fig.13, con el parámetro adimensional distancia entre pilotes sobre diámetro de los mismos:  $e/D = 3$  ó  $e/D = 6$  con  $D =$  constante  $=1.50$  m, con  $L/D = 20$ , siendo  $L = 30$  m la longitud de los pilotes. Además de variar la distancia  $e$ , se hizo variar el número de pilotes  $n$ .

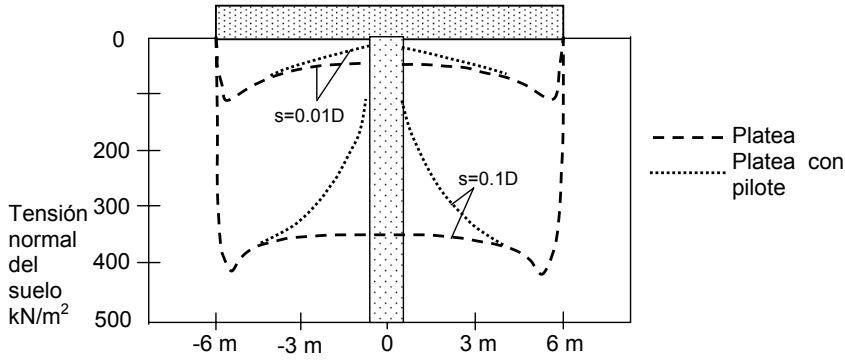


Fig. 12

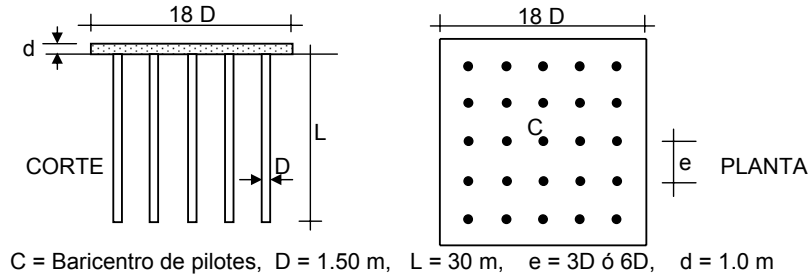


Fig. 13

En la fundación que consta solo de pilotes, se unieron los mismos con una platea sin contacto con el suelo. En la platea se hizo actuar una carga  $q$  constante sobre la misma, pero creciendo hasta alcanzar varias veces la carga de servicio.

Las conclusiones de la investigación permitieron estimar la relación de los asentamientos entre los diferentes casos: En una fundación CPP puede esperarse una reducción del asentamiento del 60% comparativamente con la platea sin pilotes, y una reducción de aproximadamente un 25% respecto a la fundación que consta solo con pilotes. Respecto a la distancia  $e$  entre pilotes, al aumentar la misma crecen los asentamientos, pero el volumen de los pilotes disminuye hasta un 60% cuando la relación  $e/D$  es duplicada. Por otra parte, al aumentar la relación  $e/D$  decrecen los valores de  $\alpha$ , con el consiguiente crecimiento de los asentamientos. Con respecto a la interacción pilotes-pilotes, para el caso frecuente de optar por el valor  $e/D = 3$ , la

capacidad de carga lateral entre los pilotes de un grupo depende de la posición de los mismos dentro del conjunto: Un pilote central transfiere por resistencia lateral una carga considerablemente menor que el resto, debido a la interacción con los pilotes que lo rodean, pero la resistencia en la base es prácticamente la misma que el resto. Sin embargo, cuando el valor  $e/D$  es del orden de cinco o mayor, la interacción entre pilotes se anula y todos transfieren la misma carga.

Los autores del estudio sugieren adoptar un valor máximo  $e/D \cong 4.5$ , ya que con valores mayores la platea asume un rol mucho más importante que los pilotes, con el consiguiente aumento de los asentamientos.

#### **4. Estado Actual del Conocimiento Referido al Análisis de una CPP**

Como ya se expresara anteriormente, para el proyecto y dimensionado de una CPP es necesario que el modelo de cálculo elegido describa en forma realista y confiable el comportamiento del suelo y de los elementos de la fundación y su forma de interactuar entre sí.

Para este fin se cuenta con diversos métodos de cálculo, que se apoyan en diferentes modelos, algunos aproximados y otros de mayor elaboración.

Los métodos más simples operan con un pilote único, requiriéndose conocer en primer lugar el comportamiento del mismo bajo diferentes condiciones del suelo. Es conveniente para ello realizar pruebas estáticas de compresión de pilotes siguiendo por ejemplo la Norma DIN 1054 en combinación con DIN 4026 y DIN 4014. Si se renuncia a realizar tales pruebas, las DIN 4014 y DIN 4026 permiten acceder al comportamiento de pilotes simples en forma empírica, pero se exige que la transferencia de los resultados a grupos de pilotes de una fundación CPP sea suficientemente fundamentada.

El estudio del *comportamiento carga-asentamiento* de pilotes individuales, grupos de pilotes y una fundación combinada platea-pilotes puede abordarse siguiendo diferentes caminos. Como se observa en el cuadro siguiente, los procedimientos disponibles se agrupan en:

- Métodos basados en modelos numéricos, que deben verificarse mediante observaciones existentes.
- Investigaciones de laboratorio o de campo, así como mediciones en edificios ya construidos.
- Métodos que recurren a modelos simplificados, propuestos sobre la base de observaciones o consideraciones analíticas.

### COMPORTAMIENTO CARGA – ASENTAMIENTO



#### 4.1. Métodos simplificados

Los métodos simplificados para predecir el comportamiento de una fundación en estado de servicio resultan satisfactorios en la etapa de predimensionado de la estructura, trátense de pilotes individuales, pilotes en grupo o CPP. Con los mismos se puede en principio estimar los parámetros involucrados, como ser número, diámetro, longitud y disposición de los pilotes. Como se señala en el cuadro anterior, estos métodos pueden agruparse en las siguientes categorías:

- Correlación empírica
- Recurrencia a modelos equivalentes, como ser:
  - Platea equivalente con área de sustitución



- Pilote equivalente de mayor diámetro
- Emparrillado de pilotes
- Métodos basados en la teoría de la elasticidad
- Apoyos independientes de los desplazamientos

En lo que sigue se presenta un resumen de los conceptos básicos de cada uno de estos procedimientos.

### **Correlación empírica**

Numerosas correlaciones para pronosticar el comportamiento carga-asentamiento de pilotes individuales son conocidas desde hace tiempo. Consisten en procesar los resultados obtenidos in situ mediante sondeos de distinto tipo o con ensayos de laboratorio para determinar la magnitud de la fricción lateral y la resistencia de punta, sea mediante tablas confeccionadas a este efecto (DIN 4014), (Katzenbach and Moormann, 1997) o a través de expresiones empíricas o semiempíricas (Findlay et al., 1997). En este último contexto, Vesic (1977) propuso un método mediante el cual indica la pendiente inicial de la curva carga-asentamiento. Según esta propuesta, el asentamiento  $w_c$  de la cabeza del pilote está dado por la suma:

$$w_c = w_a + w_b + w_L$$

donde  $w_a$  es el aplastamiento axial del fuste del pilote, y  $w_b$  y  $w_L$  son los asentamientos en el pie del pilote debidos a la fuerza en la punta y a la fuerza lateral, respectivamente.

El aplastamiento del fuste del pilote  $w_a$  puede ser determinado si la distribución y magnitud de la fricción lateral son conocidas o debidamente supuestas. Vesic propuso a su vez algunas correlaciones semiempíricas para determinar  $w_b$  y  $w_L$ , suponiendo un comportamiento elástico lineal del suelo.

La curva de distribución completa carga-asentamiento de un pilote individual puede determinarse si se conoce previamente el comportamiento de la fricción lateral y de la presión en la base. Franke(1989) y Elborg(1993) analizaron en forma estadística numerosos ensayos de pilotes perforados y propusieron un método para determinar las líneas de distribución fricción lateral-asentamiento y presión en la base-asentamiento. Con estas líneas a disposición, pudieron correlacionar las mismas con los resultados de sondeos de presión (ensayos SPT) y con la resistencia inicial al corte de arcillas.

Para pilotes perforados sus resultados se volcaron en forma estandarizada a la norma DIN 4014.

En el caso de grupos de pilotes es necesario considerar adicionalmente la influencia recíproca entre los mismos en la determinación de la curva carga-asentamiento.

Se cuenta para ello con planteos empíricos, que permiten estimar el asentamiento del grupo de pilotes mediante un factor  $R_s$  con el cual se multiplica al desplazamiento que corresponde a la curva carga-desplazamiento de un pilote individual cargado céntricamente. Las expresiones empíricas se basan por lo general en valores obtenidos por experiencia a través de mediciones in situ y en investigaciones en modelos. Entre otros autores, Skempton(1951), dio a conocer el siguiente factor para grupos de pilotes hincados en arena homogénea, en base a mediciones del asentamiento:

$$R_s = \left( \frac{13.1B + 9.0}{3.28B + 12.0} \right)^2 \quad B = \text{ancho del grupo de pilotes}$$

Meyerhoff (1959) propuso para un grupo cuadrático de pilotes hincados en arena el factor:

$$R_s = \frac{c(5 - 0.333c)}{(1 + 1/n)^2} \quad c = \frac{\text{distancia entre pilotes}}{\text{diámetro D de pilotes}}$$

$n = \text{número de filas en el grupo de pilotes}$

A su vez Vesic (1969) presentó una relación aún más simple, también en pilotes hincados en arena:

$$R_s = \sqrt{\frac{B}{D}}$$

Si bien los procedimientos empíricos posibilitan la estimación de los asientos de un grupo de pilotes uniformemente distribuidos, debe tenerse presente que no permiten determinar realísticamente los asentamientos de una CPP, ya que la interacción entre ésta, el grupo de pilotes y el suelo no son considerados propiamente. Tampoco son aptos para determinar la distribución de cargas entre el grupo de pilotes y la platea de fundación, ni siquiera para conocer la distribución de cargas entre los pilotes del grupo de acuerdo a su posición. Para ello se

han propuesto otros métodos empíricos que conducen a la determinación de las fuerzas que absorbe un grupo de pilotes de una fundación CPP, pero que a su vez no permiten determinar su asentamiento.

### ***Métodos basados en modelos de sustitución***

Los modelos de sustitución son empleados en el caso de una CPP de planta sencilla, de manera puedan ser calculados con el auxilio de métodos disponibles corrientes, como por ejemplo los aplicables a fundaciones con platea única.

Según este método, se realiza una abstracción de la fundación CPP, llevando a cabo el cálculo con un modelo simplificado, sea a través de una platea sustituta o por el contrario, a través de un pilote sustituto de gran diámetro.

a) En la primera alternativa la fundación CPP se reemplaza por una platea sustituta que se ubica a una determinada profundidad por debajo de la platea real, cuya planta es determinada en base al perímetro de los pilotes externos, incluyendo a veces un suplemento perimetral adicional. El asentamiento de la fundación CPP resulta en este caso de la suma del asentamiento de la placa sustituta – calculado por la teoría de la elasticidad considerando un semiespacio isótropo – más el acortamiento de los pilotes, que tiene lugar en la longitud entre la platea real y la platea sustituta. Dicha longitud Z está comprendida en general entre los límites siguientes:

$$0.67 L \leq Z \leq L$$

donde L es la longitud real de los pilotes. Los valores  $0.67 L \leq Z$  se adoptan cuando prevalece la resistencia lateral sobre la resistencia de punta.

La aplicación del método de la platea sustituta está limitada a estimar el asentamiento de la CPP, en particular en los casos de una gran platea de fundación y pilotes escasamente distanciados entre sí. Sin embargo, no es factible conocer la distribución de la carga exterior entre la platea de fundación y los pilotes, ni de la sollicitación de estos últimos dentro del grupo, lo cual resulta imprescindible para encarar el dimensionado.

b) En la alternativa de trabajar con un pilote sustituto, este reemplaza al grupo de pilotes reales, determinándose su diámetro y rigidez mediante expresiones aproximadas y operando con éste en la forma convencional. El método tampoco contempla la distribución de cargas entre la platea y los pilotes, es decir adolece de la misma deficiencia señalada en el caso anterior.

### **Métodos analíticos**

Una de las formas más simples de estimar el comportamiento de una fundación CPP es la conocida como principio de los apoyos independientes de los desplazamientos. Se basa en determinar en primer lugar la carga para la cual la platea experimenta asentamientos admisibles, despreciando la colaboración de los pilotes. Se asigna luego el resto de la carga exterior a los pilotes, para lo cual se admite que los desplazamientos son de tal magnitud, que se alcanza la totalidad de la carga portante de los mismos. Por lo tanto, todos los pilotes pueden ser dimensionados como si se tratara de un pilote individual, y a su vez, la platea puede dimensionarse con la carga ya determinada mediante métodos convencionales, (DIN 4019). Obviamente, esta forma de análisis desprecia por completo toda interacción entre los elementos de la CPP y el suelo, en particular las interacciones pilote-pilote y platea-pilotes, las cuales en rigor dominan el comportamiento de una CPP. A pesar de ello, este método se usa con frecuencia con motivo de su relativa sencillez y facilidad de aplicación.

Otros métodos analíticos se basan en la teoría de la elasticidad. Cabe mencionar las contribuciones de Randolph y Wroth (1978, 1983), que propusieron un procedimiento analítico simplificado para determinar la relación carga-asentamiento de pilotes individuales, en grupo y en CPP.

### **4.2. Métodos numéricos**

En las últimas décadas se ha verificado un progreso notable en el desarrollo de métodos numéricos. Para la solución de una fundación CPP se han aplicado los Métodos de los Elementos Finitos, de Diferencias Finitas, de Elementos de Borde y los llamados Métodos Híbridos. Este desarrollo ha posibilitado tener en cuenta influencias complejas en el análisis, tales como el comportamiento no lineal del suelo, inhomogeneidades, la rigidez real de los elementos estructurales y casos generales de solicitación. Un modelo numérico permite resolver

ecuaciones diferenciales no lineales, incluyendo aquellas que corresponden a la ley constitutiva que es usada para describir el comportamiento mecánico del suelo. En cualquiera de estos procedimientos, tanto las partes de la fundación como el suelo mismo se discretizan con elementos finitos bi- o tridimensionales, siendo posible considerar cualquier situación de terreno y condiciones de borde, así como el empleo de leyes constitutivas complejas. En las primeras aplicaciones del MEF se usaron modelos planos o modelos axial-simétricos, pero actualmente pueden analizarse asimismo estructuras tridimensionales, modelando el suelo de fundación sobre la base de un material elasto-plástico en lugar de un modelo totalmente elástico.

#### **4.3. Comparación de los diferentes métodos de cálculo**

La comparación entre los métodos sucintamente descritos permite concluir que la versatilidad y exactitud de los resultados obtenidos en cada caso depende fundamentalmente de las suposiciones simplificadoras involucradas y de los modelos elegidos. Los métodos aproximados, como por ejemplo el Método de Sustitución y los Métodos Analíticos, son usados generalmente en la etapa de predimensionado para estimar los posibles asentamientos. Por otra parte, al aplicar cualquier método basado en la teoría de la elasticidad, debe tenerse presente que por el comportamiento plástico del suelo resultan no linealidades que no pueden ser tenidas en cuenta en los planteos simplificados anteriores. Por consiguiente, convendría limitar la aplicación de tales métodos al estado de servicio.

Respecto a los métodos numéricos, si bien posibilitan una simulación realista y completa del comportamiento de una CPP, requieren equipos y programas computacionales adecuados y la ejecución de ensayos para determinar los parámetros requeridos por el modelo numérico. La calidad de las predicciones está fuertemente condicionada a la calidad de estos datos.

#### **5. Verificación de la Capacidad Portante (Estado Límite Último)**

En una fundación CPP es importante la verificación de la capacidad portante exterior e interior. La primera de ellas se refiere a la capacidad portante del suelo en su interacción con las estructuras de fundación. En cambio, la capacidad portante interior tiene en cuenta los elementos de la estructura, platea y pilotes.

Este tema ha sido tratado en la publicación “Richtlinie der kombinierten Pfahl-Platengründungen” (Recomendaciones para fundaciones combinadas de pilotes y platea), contenida en la obra de Katzenbach et al. (2002) en base al conocimiento de los datos característicos de los materiales: suelo y elementos de hormigón armado.

## 6. Conclusiones y Recomendaciones para el Proyecto de una CPP

\* Como se infiere de los desarrollos anteriores, es necesario tener en cuenta las diferentes interacciones si se pretende un dimensionado correcto y seguro. Un proyecto geotécnico de este tipo se considera confiable cuando las interacciones entre suelo, pilotes y platea son debidamente consideradas. El modelo de cálculo elegido debe contener planteos y algoritmos de solución que simulen adecuadamente el terreno como un continuo y los elementos constructivos de la fundación, como asimismo una acertada descripción del contacto entre el suelo y tales elementos. La correcta fijación de los parámetros de entrada, de las condiciones de borde, del conocimiento de las propiedades de los materiales, en particular el terreno, se reflejará en la confiabilidad y en la deseada exactitud de los resultados.

\* El prorrateo de la resistencia total  $R_{TOTAL}$  entre los pilotes y la platea depende del nivel de solicitación de la fundación CPP y puede alterarse significativamente con los asentamientos de la misma. El coeficiente  $\alpha$  de participación de los pilotes varía con tales asentamientos y esta variación es no-lineal. En particular, para separaciones entre pilotes con  $e/D$  mayores que 4.5, se verifica para asentamientos crecientes un claro aumento de la participación de la platea, en tanto que para valores de  $e/D$  pequeños la distribución de cargas entre platea y pilotes se mantiene casi constante cuando crecen los asentamientos.

\* La resistencia lateral promedio generada por el asentamiento en pilotes iguales en diámetro y longitud de una fundación CPP, es considerablemente mayor que el valor correspondiente para el pilote único, dependiendo tal diferencia de la posición del pilote dentro del grupo y de la distancia entre los mismos. La experiencia muestra que la capacidad portante promedio de los pilotes pertenecientes a un grupo de pilotes de una CPP es del orden de 1.5 a 2.0 veces la correspondiente a un pilote aislado de las mismas características.

\*Se debe tener en cuenta que para valores  $e/D = 3$  se debe considerar la interacción entre pilotes.

\*En cuanto a la resistencia de punta, la misma no acusa variación con la posición de los pilotes.

\* El efecto de corte entre la superficie de un pilote simple y los suelos cohesivos no aparece en los grupos de pilotes de una fundación CPP. Esto significa que por lo general la capacidad portante de los pilotes no es movilizada hasta la rotura.

\* La compresión de punta de los pilotes y particularmente su fricción lateral, son función del estado de tensiones del suelo circundante, el cual resulta de la suma del estado de tensiones primarias con anterioridad a la ejecución de tales pilotes y por el estado de tensiones adicional, con posterioridad a su ejecución, debido a la interacción pilotes-pilotes y pilotes-platea.

\*La fricción lateral no es constante a lo largo de los pilotes, y tiene distribución no-lineal con un máximo en la zona inferior de los pilotes.

\* En una CPP, para distancias entre pilotes  $e/D$  menores que 3.0, la interacción entre pilotes conduce a una significativa reducción de la acción portante de los pilotes interiores, los cuales pueden poseer un comportamiento carga-desplazamiento más "blando" que los pilotes de borde o de esquina. Distancias entre pilotes  $e/D$  mayores que 4.5 conducen a un mayor aprovechamiento de la platea y en general a mayores asentamientos de la CPP

\*Cabe afirmar que cuando se eligen distancias entre pilotes relativamente reducidas, se origina una reducción de los asentamientos, tanto absolutos como diferenciales.

\*Finalmente, no surgen dudas respecto a la economía que resulta del uso de una "CPP". Dado que la capacidad portante total puede ser movilizada, el ahorro en volumen de pilotes puede estar comprendido entre el 60% y el 80% respecto a una fundación con pilotes únicamente. A ello debe agregarse la ventaja de menores asentamientos, que se ubican entre el 50% y el 70% respecto a una fundación con platea única.

## Bibliografía

- Norma DIN 4026: Ramppfähle, Herstellung, Bemessung und zulässige Belastung. *Beton Kalender (1988)*. Ernst Sohn
- Norma DIN 1054: Baugrund: Zulässige Belastung des Baugrundes. *Beton Kalender (1994)*, Ernst & Sohn
- Norma DIN 4014: Bohrpfähle, Herstellung, Bemessung und Tragwerken. *Beton Kalender (1994)*, Ernst & Sohn
- Norma DIN 4019: Baugrund, Setzungsberechnungen bei lotrechter, mittiger Belastung, *Beton Kalender (1987)*, Ernst & Sohn
- Elborg E. (1993): Verbesserung der Vorhersagbarkeit des Last-Setzungsverhaltens von Bohrpfählen auf empirischer Grundlage. *Dissertation*, Fachbereich *Bauingenieurwesen Technische Hochschule Darmstadt*
- Findlay J.D., Brooks N.J., Mure J.N., Heron W. (1997): Design of axially loaded piles, United Kingdom Practice. *Proceedings Int.Sem. about design of axially loaded piles, Bruselas, Balkema, Róterdam, pag. 353 – 376*
- Franke E. (1989): Die Entwicklung der Tragfähigkeitsangaben in den deutschen Pfahlnormen, *Bautechnik 66, Heft 11, pag. 367*
- Katzenbach R.(1993): Zur technisch-wirtschaftlichen Bedeutung der Kombinierten Pfahl-Plattengründung, dargestellt am Beispiel schwerer Hochhäuser. *Bautechnik 70, Heft 3, pag. 161-170*.
- Katzebach R., Moormann Ch. (1997): Design of axially loaded piles and pile groups in Germany, actual practice and recent research results. *Proceedings Int. Sem. about design of axially loaded piles, European Practice. Bruselas, Balkema, Róterdam, pag. 177 – 201*
- Hanisch J., Katzenbach, König G. (2002): *Kombinierte Pfahl-Plattengründungen* . Ernst & Sohn
- Meyerhof G.(1959) : Compaction of sand and bearing capacity of piles. *ASCE, Vol 85, SM6,pag.1-29*
- Poulos H., Davies E. (1980): *Pile foundations analysis and design*. Wiley and Sons, New York



- Skempton A.W. (1951): Piles and piles foundations, settlement of pile foundations. Proceedings 3rd. ICSMPE, Zürich, Vol.3, pag.172
- Vesic A.S.(1969): Experiments with instrumented pile groups in sand. *Symposium on Deep Foundations. San Francisco, ASTM Special Publication 444, pag. 177- 222*
- Vesic A.S. (1977): Design of pile foundations. *Natural Research Council, Washington D.C.,Nº42.*
- Randolph M-F., Wroth C.P (1978).: Analysis of deformations of vertically loaded piles. *Proc.ASCE, Vol 104, 1978, pag.1465-1488*
- Randolph M-F., Wroth C.P.(1983): An analysis of the vertical deformation of pile groups. *Geotechnique 29, 1983, pag.423-439*
- Mossallamy Yasser El (1996): *Ein Berechnungsmodell zum Tragverhalten der Kombinierten Pfahl-Plattengründung.* Dissertation, Mitteilungen des Instituts und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technische Hochschule Darmstadt, Heft 36