

## Concepción y Diseño:

# Losas de Fundación Combinadas con Pilotes

Alfo Guzmán G.  
Pilotes Terratest S.A.  
Martin Achman  
Director del IGBE,  
Universidad de Hannover

Mediante el uso de losas de fundación combinadas con pilotes (LFCP) es posible obtener como ventajas una fuerte economía sobre la fundación total con pilotes y una importante limitación de asentamientos respecto de la fundación directa sobre losas.

Las Losas de Fundación Combinadas con Pilotes (LFCP) («Kombinierte Pfahl-Platten Gründungen», KPP en alemán - o «Piled Raft Foundation» en inglés) (ver Fig. 1) se han aplicado en Europa desde los años setenta como una alternativa a la fundación pura con pilotes para obras con grandes solicitaciones. En Alemania se han utilizado especialmente en el área de la ciudad de Frankfurt para la fundación de grandes rascacielos sobre suelos arcillosos. Mientras que para fundaciones de edificios de gran altura en Frankfurt, con simples losas de fundación (fundación directa), se han medido asentamientos en el orden de la decena de cm. Con la aplicación de este sistema de fundación, agregando pilotes a las losas, ha sido posible reducir estos asentamientos considerable y eficientemente (ver Figura 2). Con esto es posible obtener ahorros importantes en costos en relación a una fundación totalmente sobre pilotes (no combinada con la losa).

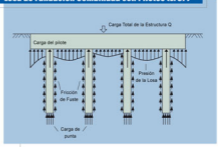
El problema con este tipo de fundaciones radica en la modelación de la interacción entre los elementos portantes losa y pilotes, lo cual es necesario para el diseño. Esto exige un gran esfuerzo de proyecto y cálculo, así como la ejecución de mediciones de monitoreo geotécnico para la observación del comportamiento del edificio y para la verificación de los cálculos realizados.

Básicamente, con el uso de fundaciones LFCP, se logra que una parte de las cargas de la estructura sea traspasada a mayores profundidades. Esto hace, por lo tanto, que las LFCP sean particularmente efectivas cuando la calidad del suelo, como es lo típico, mejora con profundidad creciente.

Una fundación LFCP se caracteriza por el coeficiente  $\alpha_{LFCP}$ , que representa la relación entre la carga que toman los pilotes y la carga total de la fundación:

$$\alpha_{LFCP} = \frac{\sum R_{pil}}{R_{tot}}$$

Figura 1  
Losa de Fundación Combinada con Pilotes (LFCP)

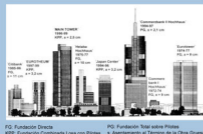


Este coeficiente puede tomar valores entre 0 y 1. En caso de que  $\alpha_{LFCP} = 1$ , se trata de una fundación pura sobre pilotes; para  $\alpha_{LFCP} = 0$  se trata de una fundación directa (losa en este caso). La experiencia muestra que para obtener una reducción efectiva de los asentamientos el valor  $\alpha_{LFCP}$  debe ubicarse cerca de 0,6 (Ver Fig. 3).

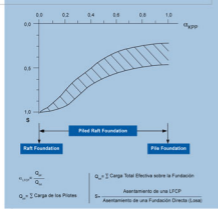
Mientras que para el diseño de una fundación pura sobre pilotes, basta con adoptar un modelo de la capacidad de carga de los pilotes del lado de la seguridad, para las LFCP se hace necesario conocer con mucha mayor precisión las características de la relación carga-deformación de los pilotes, dado que el comportamiento del conjunto depende fuertemente de éstas. Por ejemplo, pilotes muy rígidos podrían producir un punzonado en la losa, mientras que pilotes muy poco rígidos llevarían a asentamientos diferenciales importantes.

El cálculo se dificulta por el hecho que además de la influencia recíproca entre la placa y los pilotes, existen interacciones de grupo entre los pilotes, entre pilotes y suelo y además entre losa y suelo, las cuales también deben ser consideradas en el diseño. Esto hace que el cálculo de las LFCP sea un problema complejo, que por lo

**Figura 2**  
Tipos de fundaciones y asentamientos promedio de edificios en altura en Frankfurt (1)



**Figura 3**  
Asentamiento promedio proporcional en función del Coeficiente  $C_{KPP}$  según (5)



general sólo puede ser resuelto mediante métodos numéricos bajo la suposición de una ley de comportamiento del suelo no-lineal.

### Procedimiento de Cálculo

El objetivo del cálculo de una LFCP es la determinación de las cargas en cada pilote, además de las presiones de contacto en la interfase losa-suelo, para lo cual deben ser consideradas las distintas interacciones entre los elementos portantes. La economía de una fundación LFCP se produce básicamente por el hecho que los pilotes

llegan a ser solicitados hasta su carga última. Pero esto significa, que los procedimientos de cálculo que suponen un comportamiento elástico lineal del suelo (p.e. Butterfield & Banerjee [2]) no son aplicables para estos casos, dado que no representan la no-linealidad del comportamiento del sistema.

Una primera aproximación del comportamiento soportante de fundaciones LFCP se puede lograr con modelos fuertemente simplificados. Algunos de estos modelos son:

- Modelo con apoyos independientes de las deformaciones: la carga de los pilotes se supone conocida e independiente de las deformaciones. La suma de las cargas de todos los pilotes se resta de la carga total y la losa de fundación se calcula en forma tradicional para la carta restante.
- La losa de fundación se calcula según el método tradicional del coeficiente de balasto y los pilotes son considerados como apoyos adicionales y modelados como resortes individuales.

En ambos métodos mencionados no es posible modelar todas las interacciones que existen. Modelos de este tipo pueden entregar sólo valores referenciales, aptos únicamente para un predimensionado, debiéndose considerar para los parámetros del modelo, anchos de banda o rangos de variación adecuados.

Katzenbach y otros [1] entregan para el segundo modelo valores referenciales para la elección de la rigidez del resorte que modela cada pilote, los cuales fueron determinados en base a modelos numéricos (Tabla 1). La base para esto es la rigidez equivalente del resorte C determinada a partir de una curva carga-deformación de un pilote individual. Dependiendo de la distancia entre los pilotes referida al diámetro D y el largo L de éstos, la tabla entrega diferentes factores de reducción  $\zeta$  para pilotes de una fundación KPP ubicados en el centro, en los costados o en la esquina del grupo de pilotes. Los valores indicados han sido determinados para un asentamiento de un 3% del diámetro del pilote.

$$C_{KPP} = \zeta C_{\text{pilote individual}}$$

La modelación tridimensional del sistema global suelo-lasa-pilotes de una LFCP es aún (hoy con la capacidad de los computadores modernos) no realizable con un esfuerzo razonable. El estado actual del desarrollo lo representan los procedimientos de cálculo que determinan la reacción del suelo numéricamente, mediante un modelo de elementos de borde (BEM = «Boundary Elements Method»). En el método de El Mossallamy [3] se modela de esta forma la no linealidad del comportamiento del suelo mediante hipótesis simplificadoras. El procedimiento de cálculo trabaja con dos modelos: la losa se calcula como losa apoyada sobre «resortes», o sea con un modelo de elementos finitos y coeficiente de balasto. La rigidez de los resortes se modifica en forma iterativa hasta que las deformaciones y las tensiones del modelo de la losa se corresponden con las obtenidas en el segundo modelo planteado para el suelo, en base al método de los elementos de borde (BEM). Se ha comprobado que con este procedimiento de cálculo se han

**Tabla 1:**  
Factores de reducción  $\zeta_i$  para rigideces de pilotes de una LFCP,  
en comparación con el caso de un pilote individual (calculadas para  $s = 0,03 D$  según Katzenbach et al. [1])

Distanciamiento entre pilotes	Largo de pilotes	Factor de reducción $\zeta_i$		
		Pilote Central $\zeta_c$	Pilote Lateral $\zeta_l$	Pilote de esquina $\zeta_e$
e/D = 3	L/D = 10	0,13	0,19	0,25
	L/D = 20	0,11	0,18	0,25
	L/D = 30	0,11	0,18	0,25
e/D = 6	L/D = 20	0,33	0,36	0,39
e/D = 8,5	L/D = 20	0,42	-	0,70

obtenido resultados realistas de acuerdo a «back-analysis» realizados con pruebas de cargas sobre pilotes aislados y grupos de pilotes, así como la comparación del cálculo y las mediciones realizadas sobre LFCP. Es importante indicar que, sin embargo, se requiere una calibración de los parámetros del suelo del modelo mediante la comparación de los resultados en pruebas de cargas de pilotes aislados. Sólo en ese caso se obtienen predicciones aceptables.

### Conceptos de Diseño

En Alemania fueron creadas las «Reglas para el cálculo de fundaciones combinadas losa-pilotes» [4] por un grupo de especialistas. Básicamente se especifican para las LFCP altas exigencias en lo que respecta al alcance y calidad de la exploración del subsuelo. La ejecución de ensayos de laboratorio en probetas especiales para la determinación de la rigidez y de la resistencia al corte del suelo son imprescindibles. Además se debe controlar minuciosamente la ejecución de los pilotes.

Para el cálculo se debe conocer la capacidad de carga de un pilote aislado. Por lo general deben ejecutarse por lo tanto pruebas de carga. Al modelo de cálculo de fundaciones LFCP se le hacen las siguientes exigencias:


- El modelo debe estar en condiciones de simular en forma adecuada y exacta el comportamiento carga vs. deformación de un pilote individual, además de determinar la carga última.
- Debe considerarse la interacción pilote/pilote y pilote/losa
- Los modelos simplificados sólo pueden ser utilizados cuando existen condiciones simples, como suelo homogéneo, largo de pilotes y distancia entre los mismos constante, carga central sobre la fundación.

La comprobación de la capacidad de carga global de una LFCP se realiza con un factor de seguridad FS = 2. No se exige la verificación de la capacidad de carga para los pilotes individuales, ya que se permite una utilización de la capacidad del pilote hasta la carga última.

Para la comprobación de la capacidad de carga en servicio de la LFCP

se debe realizar finalmente un cálculo con una carga simple no mayorada (FS = 1), con el fin de calcular los asentamientos y distribución de esfuerzos. Dada la complejidad del comportamiento estructural, es necesario llevar a cabo un monitoreo geotécnico para la verificación del comportamiento pronosticado para el sistema (mediciones de asentamientos - siempre -, celdas de carga en los pilotes y celdas para medir la presión de contacto bajo la losa).

### Aplicaciones Posibles en Chile

Si bien hasta el momento no existen antecedentes de LFCP ejecutadas en Chile, se destaca que este sistema sería de interesante aplicación para estructuras pesadas en sitios con suelos finos (limos y arcillas) de consistencia creciente con la profundidad y susceptibles de sufrir grandes asentamientos (p.e. Valdivia y zonas aledañas). La optimización de costos que se logra con este sistema, permitiría alcanzar fundaciones económicas y seguras para estructuras pesadas, que en otras circunstancias serían inviables estructural o económicamente. 

### Referencias

- [1] Katzenbach, R. et al.: Análisis del comportamiento estructural de LFCP Pfahlsymposium, Braunschweig 1999.
- [2] Butterfield, R.; Banerjee, P.K. The problem of pile group - pile cap interaction; Géotechnique 21, 1971.
- [3] El-Mossallamy, Y.: Un modelo de cálculo para el comportamiento portante de LFCP; Darmstadt 1996.
- [4] (Reglas para el diseño, dimensionado y construcción de LFCP); Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2000.
- [5] Katzenbach, R. et al.: Posibilidades y Límites de aplicación para las LFCP, ejemplificado con proyectos actuales; 4. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, Darmstadt 1997.

(Títulos traducidos al español)



# UNYSOFT

Software con soluciones integradas para empresas de ingeniería, constructoras e inmobiliarias.

*Comienza, donde otros terminan.*

## Productos

PLANIFICACION, PRESUPUESTOS, PROGRAMACION, CONTROL PRESUPUESTARIO y PROYECCION  
**UNYPRE** Presupuestos

INDICADORES, VISION GERENCIAL  
**UNYVISION** Indicadores

VENTAS Y GESTION INMOBILIARIA  
**UNYVEN** Inmobiliaria

GESTION Y CONTROL DE SUB CONTRATOS  
**UNYSUB** Subcontratos

ADQUISICIONES  
**UNYADQ** Adquisiciones

ADMINISTRACION DE INVENTARIOS  
**UNYBOD** Bodega

MAQUINARIA, TRANSPORTE, MANTENCIÓN Y ACTIVO  
**UNYMAQ** Maquinaria

ADMINISTRACION DE PERSONAL Y REMUNERACIONES  
**UNYREM** Personal

CONTABILIDAD POR UNIDAD DE NEGOCIO Y CORPORATIVA  
**UNYFIN** Contabilidad

*Flexibles  
Modulares  
Auditoria y Gestión  
Producto nacional  
Especializados  
Integrados*

[WWW.UNYSOFT.CL](http://WWW.UNYSOFT.CL)

[ventas@unysoft.cl](mailto:ventas@unysoft.cl)

Avda. Providencia 2392 piso 5 y 6 . Providencia, Santiago, Chile.  
Fono: 234 1774 - 233 1302 - 231 8081 Fax: 234 3635



**CORPORACION EDUCACIONAL DE LA CONSTRUCCION**

