

Errores comunes en el diseño de fundaciones superficiales en la ciudad de Cochabamba, Bolivia

Gustavo Tezanos Pinto

Universidad Mayor de San Simón • Cochabamba • Bolivia
gatpl1@gmail.com

Resumen

En Cochabamba, es común que las edificaciones se sitúen en los límites laterales de los terrenos para optimizar el espacio, lo que ha llevado al uso de fundaciones superficiales con losas de cantos delgados. Esta solución, habitual en construcciones de hasta 12 niveles, puede ocasionar fallas a lo largo del tiempo. Este artículo analiza los errores comunes en el diseño de estas fundaciones y propone varias alternativas para mejorar la estabilidad estructural: aumentar el espesor de los cantos, incorporar vigas profundas, utilizar losas postensadas, adoptar fundaciones con placas plegadas y recurrir a fundaciones profundas.

En suelos de baja resistencia, como los limo-arcillosos presentes en Cochabamba, las fundaciones con cantos delgados incrementan el riesgo de asentamientos diferenciales y fallas estructurales, afectando la seguridad de los edificios. La falta de rigidez en las losas compromete la estabilidad lateral, aumenta el riesgo de vuelco o deslizamiento. Las soluciones propuestas permiten mejorar la distribución de cargas y aumentar la rigidez estructural. Un diseño que no contemple adecuadamente estas medidas puede resultar en grietas, deformaciones permanentes e incluso el colapso parcial o total de la edificación, aumentando así el riesgo cuando encaramos excavaciones al lado de estos edificios con patología impuesta o por imponerse pronto.

Palabras clave: *Estabilidad estructural, Asentamientos diferenciales, Rigidez estructural*

Abstract

In Cochabamba, it is common for buildings to be located along the lateral boundaries of plots to optimize space, which has led to the use of shallow foundations with thin-edged slabs. This solution, typical in constructions of up to 12 stories, can lead to failures over time. This article analyzes common design errors in these foundations and proposes several alternatives to improve structural stability: increasing the thickness of the slab edges, incorporating deep beams, using post-tensioned slabs, adopting folded plate foundations, and resorting to deep foundations.

In low-strength soils, such as the silty-clay soils found in Cochabamba, foundations with thin edges increase the risk of differential settlements and structural failures, affecting the safety of buildings. The lack of stiffness in the slabs compromises lateral stability, increasing the risk of overturning or lateral sliding. The proposed solutions aim to improve load distribution and increase structural rigidity. A design that does not adequately consider these measures may result in cracks, permanent deformations, or even partial or total building collapse. This risk is further exacerbated when adjacent excavations are undertaken near buildings with existing or imminent structural pathologies.

Keywords: *Structural stability, Differential settlements, Structural rigidity*

Introducción

El diseño de fundaciones en edificios apoyados en los límites laterales presenta desafíos únicos. En Cochabamba, la presencia de suelos de baja resistencia, especialmente los limo-arcillosos y arcillo-limosos, agrava estos problemas. Las fundaciones superficiales con losas de cantos delgados incrementan el riesgo de fallas estructurales y asentamientos diferenciales, lo que afecta la seguridad estructural de los edificios.

La licuefacción es un fenómeno que ocurre cuando suelos saturados pierden temporalmente su rigidez y resistencia bajo eventos sísmicos (Das, 1999). Este fenómeno es común en suelos limo-arcillosos en Cochabamba, lo que genera inestabilidad en las estructuras ubicadas en estos terrenos.

Como segundo punto se debe aclarar que el diseño de fundaciones se encuentra basado en proponer estructuras de fundación que permitan la transferencia de esfuerzos de la superestructura al suelo de fundación. Debemos considerar que la estructura es el conjunto formado por superestructura, la subestructura donde forma parte la fundación y el suelo subyacente a la misma y toda la teoría de interacción suelo estructura está basado en el semiespacio definido por Boussinesq en 1885, donde se define al suelo como un ente ideal que cumple las hipótesis siguientes:

- Esta limitado por un plano horizontal
- Es un medio continuo
- Es un medio elástico (se supone la existencia de capas suficientemente pequeñas como para admitir el comportamiento elástico)
- Es homogéneo
- Es isotrópico

En base a las hipótesis planteadas en este semiespacio Boussinesq aplico conceptos matemáticos y ecuaciones de elasticidad de cuarto orden con las condiciones de frontera siguientes:

- Los esfuerzos se desvanecen a grandes distancias $r \rightarrow \infty$
- Las deformaciones se desvanecen para $r \rightarrow \infty$
- Los esfuerzos cortantes son nulos en la superficie ($z = 0$)
- Los esfuerzos normales son nulos en la superficie excepto en el punto de aplicación de la carga.

Como es evidente estas hipótesis rara vez se cumplen y es muy rara la ocasión en la que el terreno se ajusta a estas hipótesis, y en general difícilmente y salvo contadas excepciones las cumple. Por tanto, la mecánica de suelos es una de esas materias en donde el especialista además de recurrir a planteamientos teóricos debe contar con las referencias que puedan aportar casos reales similares a los de estudio, y hacer buen uso de su criterio y experiencia personal.

La capacidad portante se refiere a la cantidad máxima de carga que el suelo puede soportar sin fallar o deformarse excesivamente. En suelos de baja resistencia, como los encontrados en Cochabamba, la capacidad portante es limitada, lo que puede llevar a fallas estructurales si no se toman las precauciones necesarias (Bowles, 1996).

Rotura generalizada: fundamentalmente por corte, el asiento suele ser del orden del 5% del ancho.

Rotura por punzonamiento (del suelo): es más común en cimentaciones profundas, o bien cuando bajo el estrato de apoyo se encuentra un estrato de peores condiciones, a poca profundidad. El asiento es del orden del 8%.

Rotura localizada: El suelo no se plastifica súbitamente, previamente la plastificación aparece en los bordes de la zapata.

El asentamiento aceptable de una fundación debe estar en el orden del 1% de su dimensión en planta más pequeña y siempre debe estar restringido por un valor máximo que podría oscilar entre 1" y 2". Siempre busca la rigidez de la estructura para contrarrestar las deformaciones que se impondrán en la fundación. En materia de fundaciones solo existen procedimientos y no así reglas específicas o pasos establecidos, solo cuando hablamos de zapatas las reglas están claras puesto que las mismas pueden entrar fácilmente en asentamientos diferenciales y por lo tanto las verificaciones responden a evitar fallos de las zapatas a partir de la implementación de bielas y tirantes, por lo que se extrapola dicho procedimiento a encepados de pilotes también. Un buen diseño de fundación sólo depende de la buena implementación del fenómeno de solicitaciones y de las deformaciones resultantes a partir de la comprensión que son de orden físico, es decir que está regido por las leyes gobernantes de la física, lo cual involucra el buen sentido común de la transmisión de esfuerzos a la fundación y a partir de dicha praxis los armados correspondientes. El hormigón armado en las fundaciones no es proceso mecánico y por lo tanto creer que se reduce a simple formulas es la camino de encontrar fallos en la concepción de las cimentaciones y debe tomarse en cuenta que los que fueron a las universidades son los profesionales y no así el suelo o el hormigón, por lo que estos actores se comportan como deben comportarse y no como las fórmulas y programas lo digan, sino el buen sentido aplicado a la física en la ingeniería de cimentaciones.

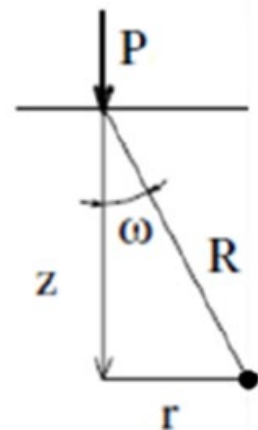


Figura 01

Semiespacio de Boussinesq

Fuente: DAS, 1999

Desarrollo

Después de 24 años de ejercicio profesional y de haber intervenido en más de 120 edificaciones, dentro de las cuales se hizo intervención de corrección a diseños o a la subestructura ejecutada de varios edificios donde se pudieron determinar anomalías impuestas en la etapa de diseño y por la experiencia acumulada en esos trabajos se puede citar que el riesgo asumido por muchos ingenieros estructurales, ejecutores sean arquitectos o ingenieros y constructores sin apoyo técnico profesional, es bastante alto, pues en el mejor de los casos se dimensionó la fundación a punzonamiento, se considera como lecho rígido para una fundación que es altamente flexible por su lecho de apoyo y dejar así de lado la seguridad de la estructura, de las viviendas colindantes y de las futuras viviendas colindantes a ser ejecutadas y no olvidar el riesgo latente de seguridad de vida que se deja. Para ejemplo de demostración de esta problemática haremos referencia al edificio del grupo TEEFE ubicado en la avenida Blanco Galindo a la altura del kilómetro 3, donde se tiene un suelo de 0.8 kg/cm de capacidad portante admisible y la sobre exigencia de suelo obtenida del suelo en un modelo del edificio de 8 pisos y una luz entre columnas de 8.5 m, llega a ser del orden de 1.6 kg/cm² a 2.00 kg/cm², modelo desarrollado en el programa SAFE P/T vs 16, a partir del cual se muestra en la figura 2 la morfología de la losa de fundación con canto constante de 80 cm y con las columnas en el perímetro de la losa de fundación.

Se puede ver en la figura 3 que el grado de explotación llega a ser superior al doble de la capacidad portante del suelo donde se desea fundar, por lo cual la búsqueda de una fundación alternativa es obligatoria. En dicho edificio se llegó a incrementar el canto de la losa de fundación hasta 1.8 m y en ningún momento se alcanzó una solicitud cercana o igual a 1.04 kg/cm² que sería el 30% por encima de la capacidad admisible que es lo que admite la norma, por lo cual en dicho edificio se utilizó fundación profunda en corrección a la originalmente planteada en el proyecto, para así tener la durabilidad garantizada en la edificación.

Figura 02

Morfología de edificio ejecutado con losa de fundación en el perímetro de las columnas
Fuente: propia, 2022

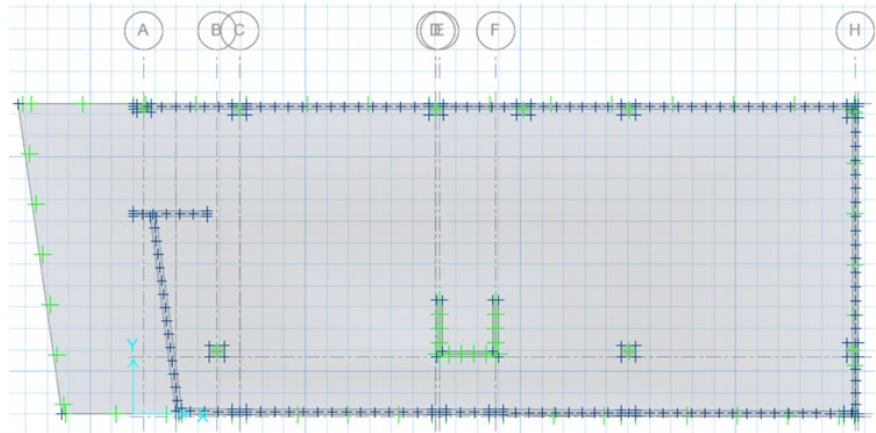
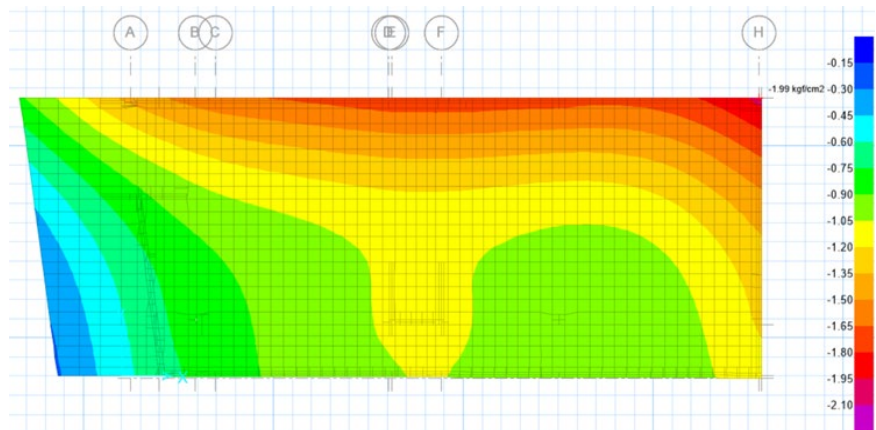


Figura 03

Solicitud de la losa de fundación del modelo en kg/cm²
Fuente: propia, 2022



En Cochabamba se baja demasiado el factor de seguridad de hundimiento del suelo, el cual debería guardarse en el rango de 2.5 a 3, dependiendo el grado de incertidumbre del suelo, y en su defecto usan factores de seguridad global al hundimiento de menos de 2.5 a 2, los cuales únicamente pueden adoptarse en los lugares con condiciones muy uniformes y solo se podría adoptar de 1.5 a 2 para construcciones provisionales o para estructuras donde los asentamientos diferenciales tienen poca importancia (Tomlinson, 2002). Un ejemplo claro de este problema se encuentra en el edificio del grupo TEEFE ubicado en la avenida Blanco Galindo, antes descrito, donde el análisis geotécnico inicial subestimó la capacidad portante del suelo, lo que condujo a una sobrecarga de las fundaciones. Como resultado, fue necesario rediseñar la losa de fundación, incrementar su canto hasta 1.8 metros para cumplir con los requisitos de estabilidad estructural. Este caso subraya la importancia de realizar investigaciones geotécnicas exhaustivas y de mantener factores de seguridad adecuados, especialmente en suelos de baja resistencia.

A continuación, se desarrollan algunos de estos errores de diseño comunes al resolver fundaciones con columnas en los límites de la losa de fundación de cantos delgados:

1. Subestimación de las Cargas Sísmicas

La licuefacción es un fenómeno que ocurre cuando suelos saturados pierden temporalmente su rigidez y resistencia bajo eventos sísmicos (Das, 1999). Este fenómeno es común en suelos limo-arcillosos en Cochabamba, lo que genera inestabilidad en las estructuras ubicadas en estos terrenos.

Para evitar el error crítico de subestimar la capacidad de carga del suelo, es crucial realizar evaluaciones geotécnicas exhaustivas y emplear los métodos más adecuados para asegurar la estabilidad de las fundaciones. Pues debemos entender que la velocidad de la onda sísmica decrementa a medida que el suelo es más débil y por lo tanto permanece más tiempo la estructura en ataque de la acción sísmica.

2. Subestimación de la Capacidad de Carga del Suelo

La capacidad portante se refiere a la cantidad máxima de carga que el suelo puede soportar sin fallar o deformarse excesivamente. En suelos de baja resistencia, como los encontrados en Cochabamba, la capacidad portante es limitada, lo que puede llevar a fallas estructurales si no se toman las precauciones necesarias (Bowles, 1996).

Existen varios factores que pueden contribuir a la subestimación de la capacidad de carga del suelo:

Insuficiente Investigación Geotécnica: La capacidad de carga del suelo varía según su tipo de suelo y sus características particulares. Una investigación geotécnica insuficiente puede llevar a una comprensión incompleta de las propiedades del suelo, lo que daría por resultado una estimación errónea de su capacidad de carga.

Errores en las Pruebas de Suelo: Las pruebas de suelo, como las pruebas de penetración estándar (SPT) o las pruebas de carga, son fundamentales para determinar la capacidad de carga del suelo. Sin embargo, errores en la ejecución o interpretación de estas pruebas pueden conducir a estimaciones inexactas de la capacidad de carga. Cabe citar que en toda campaña geotécnica debería al menos realizarse un ensayo de penetración estándar (SPT) al margen que se realicen otras pruebas de campo en teoría más modernas.

No Considerar la Variabilidad del Suelo: Los suelos en varios casos pueden ser heterogéneos y por lo tanto su capacidad de carga puede variar significativamente dentro de un área pequeña. No considerar esta variabilidad puede llevar a subestimar la capacidad de carga del suelo en ciertas áreas.

Uso de Métodos Conservadores: En algunos casos, los ingenieros pueden optar por utilizar métodos conservadores para estimar la capacidad de carga del suelo, lo que puede resultar en una subestimación de esta capacidad y, por lo tanto, en un diseño excesivamente costoso o innecesario.

Las consecuencias de la subestimación de la capacidad de carga del suelo pueden ser graves. Pueden incluir el colapso de estructuras, daños a la propiedad, lesiones e incluso pérdida de vidas humanas. Por lo tanto, es fundamental realizar una investigación geotécnica exhaustiva, utilizar métodos de prueba adecuados y considerar la variabilidad del suelo para evitar la subestimación de la capacidad de carga del suelo en proyectos de edificación para así garantizar la seguridad y la estabilidad de las estructuras construidas sobre el suelo y en la ciudad de Santa Cruz, Bolivia ya se tuvo un evento catastrófico con el edificio Málaga el 24 de enero de 2011.

3. Distribución Desigual de Cargas

La falta de atención a la distribución de cargas puede resultar en puntos de concentración de tensiones y deformaciones localizadas, especialmente en las esquinas de los edificios o como el caso de estudio que son los edificios apoyados en los límites laterales del terreno, lugares donde la distribución desigual de las cargas aumenta el riesgo de fallas locales. Se debe citar que la distribución desigual de cargas en una losa de fundación es un problema bastante común y que el mismo puede tener serias implicaciones para la estabilidad y la integridad estructural del edificio que tenga presente dicha anomalía. La losa de fundación tiene la misión de distribuir uniformemente las cargas verticales y horizontales provenientes de la superestructura del edificio hacia el suelo subyacente a ella. Cuando esta distribución de cargas no es uniforme, pueden ocurrir una serie de problemas, incluidos asentamientos diferenciales, agrietamiento de la losa y desplazamientos estructurales, que pueden comprometer la seguridad y durabilidad del edificio.

Algunas de las causas más comunes de distribución desigual de cargas en una losa de fundación incluyen:

Cargas Concentradas: La presencia de cargas concentradas, como muros portantes, columnas o vigas, puede generar puntos de alta carga en la losa de fundación. Si estas cargas no se distribuyen uniformemente a lo largo de la losa, pueden provocar una distribución desigual de las tensiones y deformaciones, lo que aumenta el riesgo de grietas y daños en la losa.

Mala Planificación del Diseño: Un diseño deficiente que no tenga en cuenta adecuadamente la distribución de cargas puede resultar en una distribución desigual de las mismas en la losa de fundación. Esto puede deberse a una estimación incorrecta de las cargas de diseño o a la falta de consideración de la geometría y disposición de la superestructura del edificio.

Variabilidad del Suelo: Los suelos pueden tener propiedades geotécnicas variables a lo largo de la superficie de la losa de fundación. Si estas variaciones no se tienen en cuenta en el diseño, pueden dar lugar a una distribución desigual de las cargas y a la concentración de tensiones en ciertas áreas de la losa.

Efectos de Cargas Externas: Factores externos como movimientos del suelo a ejecutarse de manera posterior de la construcción del edificio, cambios en el nivel freático o cargas dinámicas pueden afectar la distribución de cargas en la losa de fundación. Estos efectos pueden provocar desplazamientos diferenciales y una distribución desigual de las cargas en la losa.

Los efectos de una distribución desigual de cargas en una losa de fundación pueden ser perjudiciales para la integridad estructural del edificio. Pueden provocar asentamientos diferenciales, grietas en la losa y en la superestructura, y desplazamientos estructurales que comprometen la estabilidad del edificio. Un edificio no se diseña simplemente a solicitudes y resistencias, sino que debe ser diseñado a todos los eventos probables en el uso del mismo y no tomar en cuenta que a futuro las edificaciones vecinas pueden cambiar y que ese cambio representa la realización de excavaciones que en algún punto pueden ser de gran envergadura puede ser catastrófico para un edificio que no tomó en cuenta tal fenómeno en la elección de su canto de losa de fundación.

4. Limitaciones en la Estabilidad Lateral

La falta de rigidez de las fundaciones con cantos delgados puede comprometer la estabilidad lateral del edificio, aumentar el riesgo de vuelco o deslizamiento lateral. Las losas de fundación

con cantos delgados pueden carecer de la rigidez necesaria para soportar las cargas estructurales, lo que aumenta el riesgo de asentamientos diferenciales y daños en la estructura. La falta de rigidez estructural en las losas de fundación de un edificio es un problema significativo que puede tener consecuencias graves para la estabilidad y la seguridad de la estructura hablando como un conjunto. Como ya se citó las losas de fundación son elementos clave en la transferencia de cargas desde la superestructura del edificio hasta el suelo subyacente. Cuando dichas losas carecen de rigidez adecuada, pueden llegar a presentarse asentamientos diferenciales tan elevados que en casos extremos llegaron a un colapso parcial o total del edificio.

Algunas de las razones principales por las cuales las losas de fundación pueden carecer de rigidez estructural son las siguientes:

Espesor Inadecuado: Un espesor insuficiente de la losa de fundación puede resultar en una capacidad de carga limitada y una rigidez reducida. Esto puede deberse a una subestimación de las cargas de diseño o a una falta de consideración de las condiciones del suelo subyacente, siendo el espesor el factor predominante para contrarrestar el fenómeno de deformación natural de una losa de fundación apoyada en un lecho elástico.

Diseño Inadecuado de Refuerzo: La disposición y cantidad de acero de refuerzo en la losa de fundación son fundamentales para su capacidad de carga y rigidez. Un diseño de refuerzo inadecuado ya sea por la falta de refuerzo de acero suficiente o por una distribución incorrecta del mismo, puede resultar en una losa débil y altamente flexible.

Materiales de Construcción Inadecuados: La calidad y resistencia de los materiales de construcción utilizados en la losa de fundación al igual que en todo proyecto, son críticas para su garantizar la rigidez estructural. La utilización de materiales de baja calidad o la falta de cumplimiento de las especificaciones técnicas de diseño pueden conducir a una losa que no cumpla con los requisitos de rigidez.

Inadecuada Conexión con la Superestructura: Una conexión deficiente entre la losa de fundación y la superestructura del edificio puede comprometer la transferencia eficiente de esfuerzos de los soportes a la losa de fundación y reducir por tanto la rigidez estructural. Esto puede ocurrir debido a errores de diseño o problemas durante la construcción.

Los efectos de la falta de rigidez estructural en las losas de fundación pueden manifestarse de varias formas, como grietas en las paredes y pisos del edificio, puertas y ventanas que no cierran correctamente, y asentamientos diferenciales que pueden causar daños graves a la estructura.

5. Impacto en Propiedades Vecinas

La transmisión de cargas adicionales al suelo del predio vecino puede generar disputas legales y daños a las estructuras adyacentes, especialmente si no se toman las precauciones adecuadas durante la construcción.

La capacidad portante se refiere a la cantidad máxima de carga que el suelo puede soportar sin fallar o deformarse excesivamente. En suelos de baja resistencia, como los encontrados en Cochabamba, la capacidad portante es limitada, lo que puede llevar a fallas estructurales si no se toman las precauciones necesarias (Bowles, 1996). Con este fin buscado de garantizar una capacidad portante admisible se deben plantear alternativas de fundación para los suelos que

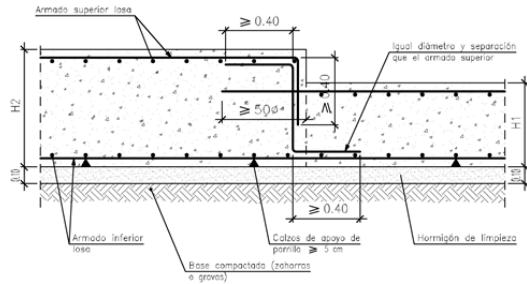


Figura 04

Aumento superior del canto de cimentación para paliar la sobre exigencia del suelo

Fuente: Modificado de los detalles constructivos del programa Cycacad

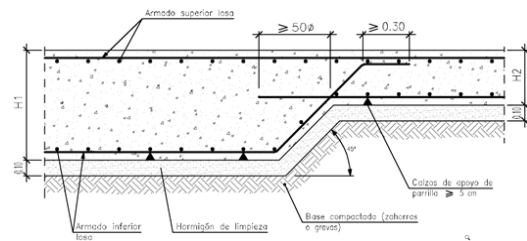


Figura 05

Fuente: Modificado de los detalles constructivos del programa Cycacad

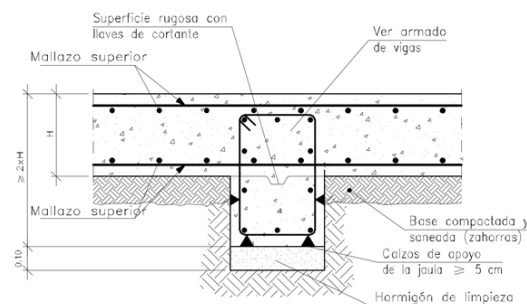


Figura 06

Incorporación de viga de fundación del doble del canto de la cimentación

Fuente: Modificado de los detalles constructivos del programa Cycacad

están muy próximos a su valor máximo de explotación y que por otro lado las columnas se encuentran ubicadas en los límites de la fundación. Las cuales se plantean a continuación: :

5.1 Aumento del espesor de los cantos

Incrementar el espesor de los cantos de la fundación puede mejorar significativamente la capacidad de carga y la rigidez estructural, reduce así el riesgo de deformaciones excesivas. Cuando se considera el recrecido del sector colindante que sostiene al edificio con apoyo lateral, se ve la razón de incorporar losas fungiformes, las cuales son muy aptas para toda esta problemática, pues responden a la búsqueda de optimizar el hormigón armado que se va a suministrar o directamente realizar el incremento de la losa de fundación en el límite lateral colindante en una dimensión mayor a 1/6 de la luz entre columnas de borde y centrales de la edificación.

5.2 Incorporación de vigas profundas de fundación

Se considera la incorporación de una viga profunda cuando se necesita aumentar la capacidad de carga o mejorar la estabilidad de la estructura existente. Las vigas profundas son elementos estructurales que se utilizan para transferir cargas desde la losa de cimentación hacia el suelo de soporte de manera más eficiente y la dimensión de la misma debe ser del orden del canto de la losa de fundación o superior, velando de cumplir la relación de 1/3 con su ancho y que dichas vigas puedan albergar el ancho de las columnas dentro de sus dimensiones. Por lo tanto, si la carga sobre la losa de fundación existente es mayor de lo que puede soportar la misma, se pueden agregar vigas profundas para distribuir mejor la carga hacia el suelo subyacente y así evitar asentamientos diferenciales, lo que significa que se quiere impedir que ciertas áreas se hundan más que otras, pues las vigas profundas pueden ayudar a nivelar la estructura al distribuir uniformemente las cargas. También se debe indicar que las estructuras que experimentan cargas laterales significativas, tales como vientos fuertes o sismos, la incorporación de vigas profundas en la losa de fundación puede mejorar la estabilidad y resistencia estructural. La incorporación de vigas profundas en una losa de fundación aumenta la capacidad portante del suelo, especialmente en suelos de baja resistencia como los encontrados en Cochabamba. Las vigas profundas actúan redistribuyendo las cargas de manera más eficiente, ampliar la superficie de contacto con el suelo y minimizando los asentamientos diferenciales. Su diseño debe considerar una relación entre el canto y el ancho que garantice una distribución homogénea de las tensiones, y el dimensionamiento adecuado de estas vigas es fundamental para garantizar la estabilidad estructural a largo plazo.

5.3. Utilización de losas postensadas

Las losas postensadas ofrecen una solución eficaz para mejorar la rigidez y la resistencia de las fundaciones superficiales en suelos de baja

**Figura 07**

Losa de fundación postensada en la ciudad de Oruro, Bolivia

Fuente: propia, 2018

resistencia, distribuyendo uniformemente las cargas y reduce los riesgos de deformaciones diferenciales. Las losas postensadas son una alternativa innovadora y efectiva para la construcción de fundaciones en edificaciones, ofrece las mismas numerosas ventajas en términos de resistencia, durabilidad y eficiencia constructiva. Aunque tradicionalmente se utilizaron en la construcción de losas de entrepiso y puentes, su aplicación en fundaciones superficiales ha ganado popularidad debido a sus beneficios potenciales en términos de distribución de cargas, reducción de deformaciones y aceleración del proceso constructivo.

Las losas postensadas están compuestas por tendones de acero de presfuerzo que han sido colocados estratégicamente dentro del hormigón de manera previa. Estos tendones se tensarán después que el hormigón haya sido vertido y el mismo haya llegado a su resistencia de diseño, lo que genera una fuerza de compresión interna que mejora la resistencia y rigidez de la losa por el apalancamiento interno que se genera, que predispone al hormigón pretensado a recibir las cargas de la superestructura. Debido a la mejora en la capacidad de carga proporcionada por el postensado, las losas postensadas pueden tener espesores menores en comparación con las losas convencionales, lo que resulta en ahorros de materiales y costos de construcción, a partir del punto de la flexión que se genera en las losas e igual manera palia el esfuerzo de corte por flexión, pero no así el de punzonamiento. El postensado introduce fuerzas de compresión en la losa que mejoran significativamente su rigidez y capacidad de carga. Esto no solo reduce las deformaciones, sino que también minimiza los asentamientos diferenciales, un problema común en suelos de baja resistencia. Al mantener la losa comprimida, se incrementa su resistencia a la fisuración y se optimiza la capacidad de soportar cargas dinámicas, como las inducidas por eventos sísmicos o por la variación en el nivel freático. El postensado proporciona una mayor resistencia y rigidez a la losa, lo que permite soportar cargas más pesadas y resistir mejor los esfuerzos sísmicos y de viento. La prefabricación de los tendones y la capacidad de trabajar en condiciones controladas en el sitio de construcción pueden acelerar el proceso constructivo, reduce los tiempos de ejecución y los costos asociados. La reducción de deformaciones y la mejora en la distribución de cargas pueden disminuir la necesidad de mantenimiento a largo plazo, lo que resulta en ahorros adicionales durante la vida útil

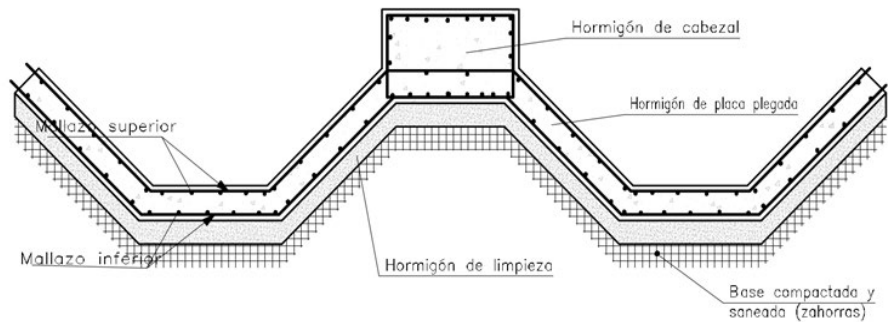


Figura 08

Incorporación de placas plegadas
prismáticas en la cimentación

Fuente: Propia

de la estructura. Las losas postensadas ofrecen flexibilidad en el diseño, lo que permite adaptarse a diferentes condiciones del suelo y requisitos de carga sin comprometer la seguridad o la eficiencia estructural. Por lo antes expuesto las losas postensadas pueden generar ahorros a largo plazo debido a su menor mantenimiento, pero no podemos negar que el costo inicial de materiales y mano de obra puede ser mayor en comparación con las fundaciones convencionales, pues estas no sufren de fisuración al estar comprimidas en todo momento.

5.4 Adopción de Fundaciones con Placas Plegadas

Las fundaciones con placas plegadas ofrecen una alternativa económica y eficaz para aumentar la capacidad de carga y la estabilidad lateral en suelos de baja resistencia, proporcionar una distribución uniforme de las cargas y minimizando los efectos de la carga adicional en el suelo del predio vecino. Dan por lo tanto una mayor estabilidad en suelos problemáticos, reduce así los riesgos de deformaciones y fallas estructurales.

Las placas plegadas hormigonadas en sitio son una solución innovadora y efectiva para la construcción de fundaciones en edificaciones. Estas placas ofrecen una serie de ventajas en términos de distribución uniforme de cargas, resistencia estructural y eficiencia constructiva. Las placas plegadas como su nombre lo indica presentan un diseño plegado que consiste en una serie de celdas alveolares que proporcionan resistencia y estabilidad a la placa. Este diseño permite una distribución uniforme de cargas a lo largo de toda la superficie de la fundación, lo que reduce los puntos de concentración de tensiones y minimiza los asentamientos diferenciales. El acero de refuerzo incorporado y el diseño estructural de las placas proporcionan una mayor resistencia y estabilidad a la fundación, lo que garantiza su capacidad para soportar cargas pesadas y resistir movimientos del suelo sin tener dependencias de elementos externos tales como placas prefabricadas o pilotes, lo que simplifica el proceso constructivo y reduce los costos asociados.

5.5 Consideración de Fundaciones Profundas

En casos donde las condiciones del suelo no permiten la utilización de fundaciones superficiales adecuadas, se pueden considerar opciones de fundaciones profundas, para proporcionar una base estable y resistente, pues la rigidez de la fundación tiene su sustento en que el asentamiento máximo permitido es del 1% del diámetro del pilote, lo cual en un diseño adecuado nos da un elevado aumento de la rigidez de la fundación. Cuando se enfrenta a suelos de alta deformabilidad, como aquellos con baja

resistencia o suelos expansivos, las fundaciones profundas se convierten en una opción a considerar. Estas fundaciones son estructuras que mandan las cargas de la superestructura a profundidades significativas por debajo de la superficie del suelo para alcanzar capas de suelo con mejores condiciones de estabilidad y capaces de soportar las cargas estructurales. Esto les permite distribuir las cargas de manera más uniforme y reducir los riesgos de asentamientos excesivos lo cual garantiza una mayor estabilidad estructural y reduce el riesgo de movimientos diferenciales que podrían causar daños a la edificación. Las fundaciones profundas pueden soportar cargas estructurales más exigentes debido a su mayor área de contacto con el suelo a lo largo de ellas y su capacidad para llegar a capas más resistentes del suelo. Esto las hace ideales para edificaciones de varios pisos o estructuras con cargas concentradas. Cabe indicar que las fundaciones profundas son altamente adaptables a una variedad de condiciones del suelo. Pueden utilizarse en suelos blandos, suelos expansivos, suelos con alto contenido de agua u otros tipos de suelos problemáticos. Dentro de estas fundaciones profundas en la construcción de las edificaciones se tienen a los pilotes, micropilotes y las tablas estacas.

Pilotes: Son elementos estructurales cilíndricos, generalmente de concreto, acero o madera, que se hincan o perforan en el suelo para transferir cargas de una estructura a capas más profundas y resistentes del terreno.

Micropilotes: Son pilotes de pequeño diámetro (generalmente menos de 300 mm), empleados en espacios reducidos o para refuerzos de cimentaciones existentes. Su instalación suele implicar perforación y la inyección de lechada de cemento.

Tablaestacas: Son elementos verticales, de acero o madera, utilizados para formar muros de contención en excavaciones o taludes. Se interconectan para crear una barrera continua que retiene el suelo y resiste las presiones laterales.

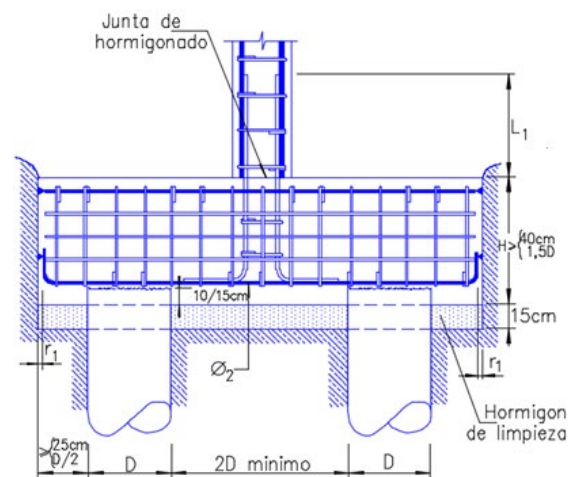
Conclusiones

La capacidad portante se refiere a la cantidad máxima de carga que el suelo puede soportar sin fallar o deformarse excesivamente. En suelos de baja resistencia, como los encontrados en Cochabamba, la capacidad portante es limitada, lo que puede llevar a fallas estructurales si no se toman las precauciones necesarias (Bowles, 1996).

La conceptualización arquitectónica de edificios apoyados en los límites del terreno en los suelos con capacidad admisible igual o menor a 1 kg/cm², debe ser analizada con mucho rigor y lógicamente no permitir el

Figura 09

Incorporación de fundaciones profundas en la cimentación
Fuente: Modificado de los detalles constructivos del programa Cypecad



apoyo entre edificios con suelos con dichas características garantizaría que no se presenten las anomalías planteadas y esta opción debería ser analizada por los colegios de profesionales competentes, al igual que las autoridades responsables de la aprobación de edificaciones.

Se debe llamar la atención de las profesiones del área de la construcción, de las universidades, de las instituciones municipales y gubernamentales de la ciudad de Cochabamba, como de Bolivia en general para que nos suceda un fenómeno como el ocurrido en el sismo de Turquía, pues la cantidad de construcciones que se realizan en la ciudad de Cochabamba sin la intervención de profesionales cualificados es impresionante, construcciones que fácilmente pueden tener el problema descrito en este artículo y el desconocimiento de este problema por parte profesionales del área de ingeniería civil es aún peor y lamentablemente, pues no solo queda el problema en la anomalía impuesta sino que es una anomalía latente a recrudecerse o presentarse en cualquier momento en el quehacer profesional pues si intervenimos en una construcción aledaña una losa de fundación de canto delgado que pertenece a un edificio construido apoyado en el límite de su propiedad y dicho apoyo es colindante a nuestra excavación vamos a ser causantes de la detonación de la anomalía impuesta a dicho edificio y deberíamos tomar todos los recaudos necesarios de ejecutar una obra de contención previa a la excavación con la consideración de la sobrepresión existente, pues nuestra intervención colocaría en riesgo estructural a la edificación vecina sin ser responsables de las malas actuaciones que antecedieron a la conceptualización y construcción de la losa de fundación vecina. Razón por la cual podemos considerar a esta anomalía un cáncer a la espera de su detonante dentro del campo de la patología estructural.

Las fundaciones en suelos de baja resistencia requieren soluciones específicas para garantizar la seguridad estructural a largo plazo. Al adoptar mejores prácticas de diseño y realizar estudios geotécnicos detallados, se pueden evitar los errores comunes que resultan en asentamientos diferenciales y fallas estructurales. La implementación de soluciones como las losas postensadas y las fundaciones profundas no solo mejora la capacidad de carga de las estructuras, sino que también reduce significativamente el riesgo de asentamientos diferenciales y fallas estructurales, especialmente en zonas urbanas de Cochabamba con suelos de baja resistencia. Al adoptar estas tecnologías, los diseñadores pueden asegurar una mayor durabilidad y estabilidad de las edificaciones, mitigar los efectos de cargas dinámicas y geotécnicas adversas.

Los constructores de nuevos edificios ubicados al lado de edificios con columnas ubicadas en los límites de la losa de fundación deben tomar en cuenta que la solicitud en el suelo está sobre exigida y que la posibilidad de infringir daño al edificio preexistente es demasiado grande, por lo que deberán realizar apantallamientos que garanticen que la fundación vecina no sea afectada a corto, mediano y largo plazo.

En muchos países desarrollados, como Estados Unidos y Australia, el uso de losas postensadas en fundaciones ha ganado terreno debido a su capacidad para distribuir cargas de manera uniforme y reducir las deformaciones diferenciales. Según un estudio realizado por el Post-Tensioning Institute (PTI), se estima que más del 30% de las fundaciones en áreas urbanas con suelos problemáticos utilizan losas postensadas debido a su eficacia en suelos de baja resistencia (PTI, 2020).

Las losas postensadas ofrecen ventajas significativas, incluyendo la reducción del espesor necesario de la losa, lo que a su vez disminuye los costos de materiales y tiempo de construcción. En comparación con las fundaciones tradicionales, las losas postensadas también proporcionan una mayor resistencia a los movimientos del suelo y los efectos sísmicos, reduce el riesgo de fallas estructurales.

Un estudio reciente del National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) muestra que aproximadamente el 40% de las edificaciones en el sur de los Estados Unidos, donde los suelos expansivos son comunes, han adoptado losas postensadas en fundaciones para mitigar los riesgos asociados con los asentamientos

diferenciales (NRMCA, 2021). En Australia, esta cifra es aún mayor, alcanza un 60% en algunas regiones con suelos de baja capacidad portante (Engineers Australia, 2020).

Dada la eficacia comprobada de esta técnica en otros países, su adopción en Cochabamba podría ofrecer una solución práctica y económica para mejorar la estabilidad de las estructuras en suelos de baja resistencia. Las losas postensadas no solo reducen el riesgo de fallas, sino que también optimizan el uso de materiales y el tiempo de construcción, lo que las convierte en una opción viable y sostenible.

Glosario

Asentamientos diferenciales: Son desplazamientos desiguales en diferentes puntos de la fundación de un edificio, causados por variaciones en la capacidad portante del suelo. Los asentamientos diferenciales pueden generar grietas y deformaciones estructurales.

Cantos delgados: Se refiere al espesor reducido de las losas de fundación. Cuando el canto de la losa es insuficiente, la fundación puede no tener la rigidez necesaria para soportar las cargas estructurales, lo que incrementa el riesgo de asentamientos diferenciales y fallas estructurales.

Estabilidad lateral: Se refiere a la capacidad de una estructura para resistir fuerzas que intentan hacerla volcar o deslizarse lateralmente. En fundaciones con cantos delgados y suelos de baja resistencia, la falta de rigidez puede comprometer esta estabilidad.

Fundaciones con placas plegadas: Estas son fundaciones innovadoras que distribuyen las cargas de manera más eficiente mediante un diseño plegado o alveolar. Este tipo de estructura proporciona mayor rigidez y estabilidad, especialmente en suelos problemáticos.

Fundaciones profundas: Son cimentaciones que transmiten las cargas a capas más profundas y resistentes del suelo. Se utilizan en casos donde los suelos superficiales no tienen suficiente capacidad portante, como en suelos limo-arcillosos o arcillo-limosos.

Fundaciones superficiales: Son un tipo de cimentación donde las cargas estructurales se transmiten al suelo cercano a la superficie.

Losas postensadas: Son losas reforzadas con cables de acero tensados después de que el concreto ha fraguado. El postensado introduce fuerzas de compresión, lo que mejora la rigidez y la capacidad de carga de la losa, reduce el riesgo de fisuración y asentamientos diferenciales.

Patologías estructurales: Se refiere a las anomalías y defectos que afectan a una estructura, compromete su funcionalidad y seguridad.

Suelos de baja resistencia: Son suelos que no pueden soportar grandes cargas estructurales sin sufrir deformaciones significativas.

Vigas profundas: Elementos estructurales que se añaden a las fundaciones para aumentar su capacidad de carga y mejorar la distribución de esfuerzos al suelo. Su función es incrementar la rigidez de la fundación, reduce el riesgo de deformaciones y mejorar la estabilidad de la estructura.

Referencias



- Antezana, F. P., Salinas, C. N. A., & Torres Navarro, J. (2021). *Integrated characterisation and analysis of landslide areas combining Finite Elements Method modelling and Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) techniques applied to Taquíña Basin in Cochabamba-Bolivia*. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. <https://www.issmge.org/publications/publication/integrated-characterisation-and-analysis-of-landslide-areas>
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Calavera, J. (1991). *Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón armado*. Intemac.
- Das, B. M. (1999). *Principios de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning.
- Engineers Australia. (2020). *The Use of Post-Tensioning in Building Foundations in Australia*. <https://www.engineersaustralia.org.au>
- Eng-Tips. (2020). *Soil investigation in Cochabamba, Bolivia*. Geotechnical Engineering General Discussion Forum. <https://www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=472507>.
- National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA). (2021). *Concrete Foundations in Expansive Soils*. <https://www.nrmca.org>
- Pazzi, V., Del Soldato, M., Song, C., Yu, C., Li, Z., & Cruz, A. (2021). *InSAR, seismic noise, and geotechnical data to assess landslide activity and geometry: the Villa de Independencia (Cochabamba, Bolivia) case study*. EGU General Assembly 2021. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-12300>
- Peck, R. B. (2002). *Foundation engineering*. Limusa.
- Post-Tensioning Institute (PTI). (2020). *Post-Tensioned Concrete in Urban Foundations*. <https://www.pti.org>
- Tomlinson, M. J. (2002). *Diseño y construcción de cimientos* (6th ed.). Pearson Prentice Hall.