

Análisis y diseño de losa para fundación



Grado Académico Licenciatura

Abstract

The subject of the present project is slab Analysis and design for foundation. This it consists of a program that helps to the analysis and the design of slabs for foundation, developed in the language of Visual Basic.Net 2003.

The primary target of this project consisted of elaborating a computational tool for the analysis and design of slabs for foundation, that fulfills the requirements that establish the Code of Layings of foundations of Costa Rica and the Seismic Code of Costa Rica 2002.

The program considers the following aspects: the last capacity of support of the ground, the area required by a slab, the establishments in the ground, the stability of structure and the design of slabs and beams of mooring.

Thus, the result of this study was a program simple but able to make the basic calculations related to the subject, considering the effective norms in Costa Rica.

Resumen

El tema del presente proyecto es *Análisis y diseño de losas para fundación*. Este consiste en un programa que ayuda al análisis y al diseño de losas para fundación, desarrollado en el lenguaje de Visual Basic.Net 2003.

El objetivo principal de este proyecto consistió en elaborar una herramienta computacional para el análisis y diseño de losas para fundación, que cumpla con los requisitos que establece el Código de Cimentaciones de Costa Rica y el Código Sísmico de Costa Rica 2002.

El programa considera los siguientes aspectos: la capacidad de soporte última del suelo, el área requerida por una losa, los asentamientos en el suelo, la estabilidad de estructura y el diseño de losas y de vigas de amarre.

Así, el resultado de este estudio fue un programa sencillo pero capaz de realizar los cálculos básicos relacionados con el tema, considerando las normativas vigentes en Costa Rica.

Análisis y diseño de losas para fundación

Marlon Solano Esquivel

Noviembre, 2005

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio	1
Resumen ejecutivo.....	2
Introducción.....	5
Metodología	7
Marco Teórico	10
Losas para fundación	10
Cargas sobre la losa.....	11
Premisas del diseño del concreto reforzado	13
Análisis y diseño de losas para fundación ..	13
Rigidez de la losa.	14
Capacidad de soporte admisible del suelo..	15
Área requerida de la losa para fundación ...	16
Estabilidad de la losa para fundación.....	17
Asentamientos en una losa para fundación	17
Diseño de losas para fundación	18
Diseño de vigas para fundaciones	19
Resultados	21
Análisis de los resultados	26
Conclusiones-Recomendaciones	28
Limitaciones del programa.....	29
Apéndices	30
Anexos	31
Referencias	32

Prefacio

Toda estructura realizada por la ingeniería civil necesita un medio de soporte para transmitir las cargas de su propio peso, así como las causadas por acciones temporales o bien por efectos naturales, como el sismo y el viento. A este medio se le denomina cimentación, y es un elemento estructural que garantiza la estabilidad de la edificación.

La cimentación es un elemento importante para el desempeño estructural de la obra civil, ya que es la encargada de transferir las acciones o cargas presentes en ella. Además debe ser capaz de resistir los asentamientos que se presenten. Por lo tanto, debe cumplir con algunos requisitos como: la transferencia de los esfuerzos y el control de las deformaciones, los cuales son regulados por los códigos vigentes de los respectivos lugares en donde se realice la construcción.

Por existir diferentes tipos de suelos, con características particulares, el profesional responsable del diseño debe analizar y recurrir al sistema de cimentación más adecuado para el sitio donde se construya la obra.

En Costa Rica, como en muchos lugares del mundo, existen diferentes tipos de suelos. Según el Código de Cimentaciones de Costa Rica (C.C.C.R.) en su sección 1.2, se identifican arcillas de alta expansión, limos de baja resistencia, suelos artificiales, suelos granulares finos de baja resistencia, entre otros, en donde puede presentarse la necesidad de realizar fundaciones por medio de losas flotantes, esto cuando el suelo no presenta las características adecuadas para utilizar una cimentación por placa corrida o placa aislada. También la losa flotante es utilizada en estructuras con riesgo de estabilidad.

Además, en Costa Rica, hace poco se implementó una nueva normativa respecto al comportamiento sismo-resistente de las estructuras (Código Sísmico de Costa Rica 2002). Esta normativa brinda -en comparación al Código Sísmico de Costa Rica 1986- nuevos y

diferentes parámetros acerca del diseño estructural. Por ejemplo, relacionado con el criterio de diseño, que anteriormente se utilizaba, el método de esfuerzos de trabajo. Según este, el margen de seguridad se logra con esfuerzos admisibles bajo cargas de servicio. Estas son fracciones de la resistencia a la compresión concreto y del esfuerzo de fluencia. Además, el material actúa en el rango elástico de la curva de esfuerzo-deformación. En consecuencia, se obtienen resultados conservadores y de menor costo en comparación con el método actual de diseño, denominado de resistencia última.

El método de resistencia última permite seleccionar las dimensiones de concreto y de refuerzo; puesto que su resistencia es capaz de soportar las fuerzas resultantes de estados hipotéticos de sobrecarga, actuando el material en el rango inelástico de la curva esfuerzo-deformación. En resumen, contempla coeficientes de reducción para la resistencia de los materiales y diferentes factores para la amplificación de las acciones en la estructura.¹

El diseño de losas para fundación requiere del conocimiento de la capacidad de carga admisible del suelo, además determinar el área necesaria y el espesor de la losa, el refuerzo de acero necesario para resistir las cargas, y hasta el diseño de vigas de amarre para la fundación que contribuyan con la rigidez del elemento. Cada uno de estos pasos implica la utilización de tablas, figuras, cálculos y realizar varios intentos para definir los valores adecuados en el diseño.

En la actualidad se cuenta con diversas herramientas computacionales que colaboran con el análisis y el diseño de losas para fundaciones, basados en normas Norteamérica como las dispuestas por American Concret Institute (ACI) u otras. Nuestras regulaciones se basan en estas, pero aún así son diferentes, debido a las

¹ Nilson, Arthur H. Diseño de Estructuras de Concreto, pág. 15

condiciones que presenta nuestro medio y el de ellos.

Además, la adquisición de alguna de estas herramientas representa un costo elevado para un profesional o estudiante con la necesidad de realizar esta labor.

Ante esto, resulta interesante desarrollar una herramienta computacional que colabore con el análisis y diseño de losas para fundaciones considerando las características de los diferentes suelos, así como la normativa de nuestros códigos. Proporcionando así un medio que facilite el trabajo relacionado con el tema, basado en las disposiciones de nuestro entorno, a profesionales y estudiantes que muestren el interés.

Por último, como autor de este estudio, deseo expresar un sincero agradecimiento al

profesor Gustavo Rojas por su orientación en el desarrollo de este tema, así como a aquellos compañeros y profesores de la Escuela de Ingeniería en Construcción que en su debido momento brindaron la información requerida para el desarrollo del proyecto. Además de forma especial a mi madre María Eugenia, mi padre Martín y mi hermano Jonathan quienes han sido un pilar durante el desarrollo de mis estudios en la ingeniería. También a mis compañeros Steven, Fabio, Andrés, Gabriela y Erick, por el apoyo que brindaron durante mis años de estudio en el ITCR, porque sin la ayuda de ellos no alcanzaría esta meta.

Resumen ejecutivo

El presente proyecto tuvo como objetivo principal producir una herramienta computacional para el análisis y diseño de losas para fundación. Esta herramienta considera las disposiciones que establece el Código Sísmico de Costa Rica 2002 (CSCR-2002), logrando así un programa que responda a las normativas vigentes en Costa Rica.

En Costa Rica existen diferentes tipos de suelos, algunos con muy buenas características físicas para la construcción de obras, otros, no tanto. Esta situación obliga al profesional a realizar diseños considerando los diferentes tipos de cimentaciones.

En el caso de losa para fundación, estas pueden usarse cuando el suelo presenta las siguientes características: baja resistencia a la capacidad de carga, deformaciones considerables (aquellas que violan las normativas existentes) o sistemas como la placa corrida y la placa aislada resultan ineficientes, o bien en lugares con riesgo de estabilidad.

El diseño de estos elementos requiere de diversos parámetros geotécnicos y estructurales, mostrados en las especificaciones del Código de Cimentaciones de Costa Rica (CCCR) y el Código Sísmico de Costa Rica 2002 (CSCR-02), el cual tiene pocos años de vigencia en el país.

Además, la adquisición de programas para el análisis y el diseño de estos elementos, comúnmente están regulados por normativas internacionales, que difieren a las de nuestro medio. Y representan un costo elevado para estudiantes o profesionales de ingeniería en construcción.

Debido a lo anterior, se consideró necesario facilitar el análisis y de diseño de losas para fundaciones rígidas mediante la realización de un programa computacional, que ayude con el análisis del cimientado y el diseño de las dimensiones del mismo, mediante la determinación de la estabilidad, los

asentamientos del suelo, el área mínima requerida, el refuerzo de acero de cada una de las sub-losas que conforman el cimientado, dependiendo del ancho y largo determinados. Así como el diseño de vigas de fundación.

Con el fin de alcanzar esta meta, se definen los siguientes objetivos, como parámetros del proyecto:

1. Definir los parámetros geotécnicos para determinar la capacidad de carga.
2. Definir el área de losa necesaria para transmitir adecuadamente las cargas que actúan sobre el cimientado.
3. Analizar la estabilidad de la losa.
4. Analizar los asentamientos que se presentan en el suelo donde descansa el cimientado.
5. Calcular el refuerzo de acero necesario para que una losa soporte las acciones que se presentan sobre ella. (La flexión y el cortante)
6. Calcular las dimensiones que requieren las vigas de fundación o nervaduras en una losa de fundación.
7. Calcular el refuerzo de acero necesario para las vigas de fundación.

Para alcanzar cada uno de estos objetivos se realizó una búsqueda de información referente al tema en diversas fuentes; también se realizaron consultas sobre el análisis y diseño de losas para fundación a personas con conocimientos sobre este tema y en la manipulación del software para obtener el producto deseado.

La realización de diagramas de flujo, contribuyó en la elaboración de cada uno de los elementos que integran el programa.

Gracias a la investigación realizada se logra elaborar una aplicación, que permite el determinar los siguientes factores:

- La capacidad de soporte última del suelo.
- El área requerida por una losa para fundación de sección rectangular.
- El área requerida por una losa para fundación de sección L.
- El área requerida por una losa para fundación de sección T.
- Los asentamientos totales que se presentan en el suelo sobre el cual descansa el cimiento.
- El factor de seguridad contra el volcamiento para la estructura.
- El refuerzo de acero necesario de una losa para soportar las cargas presentes.
- El refuerzo de acero necesario de una viga de amarre para soportar las cargas presentes, además de considerar en el diseño la necesidad de utilizar aros o no.

Como resultados de la determinación de la capacidad de soporte última del suelo, se lograron definir ecuaciones que describen el comportamiento de las curvas de los factores de carga, según Meyerhof y Bell.

El resultado principal del trabajo es una herramienta computacional que ayuda en el análisis y diseño de losas para fundación, ya que colabora con la determinación de los aspectos mencionados anteriormente.

El producto de cada una de estas tareas ha sido el programa AD Losas Para Fundación. Este presenta una interfase agradable para el usuario, pues permite ingresar los datos básicos para la realización de cada una de las tareas.

Además, se desarrolló un manual de usuario que ayuda a la utilización adecuada del programa. Este puede observarse en el apéndice del presente informe. Ahí mismo se muestran ejemplos realizados manualmente y llevados a un procesador de texto, o bien por medio de MS-Excel 2003, con la finalidad de comparar estos resultados con los obtenidos por el programa, y lograr evaluar la labor del mismo.

Como se a dicho, el programa elaborado considera normativas definidas por nuestros códigos, como por ejemplo, lo indicado en el capítulo 4 del CCCR, referido a losas para fundación, o bien el cálculo de los asentamientos según la sección 7.4 y la determinación del factor de seguridad contra el volcamiento según las consideraciones de diseño de la sección 6.3.c, también del CCCR.

Mientras que para el refuerzo en una losa y una viga de amarre se tomaron en cuenta las disposiciones del CSCR 2002, con respecto al refuerzo de acero máximo y mínimo indicados en su capítulo de "Concreto Reforzado".

Es importante indicar que la herramienta desarrollada es para el diseño de una losa de comportamiento rígido, por lo que se debe verificar esta condición para hacer uso del diseño estructural del cimiento mediante el programa.

Por otra parte, se puede decir que el alcance del proyecto fue la herramienta computacional "AD Losas para Fundación". Esta, en su ventana de ingreso, muestra la Figura 1.



Figura 1. Ventana de inicio de “AD Losas para Fundaciones”

Introducción

La ingeniería es un campo en donde la creatividad, el razonamiento, el análisis y la selección son fundamentales para la solución de problemas o interrogantes en las actividades humanas. Así, la creatividad, el razonamiento y el análisis deben ser aplicados por el ingeniero a la hora de elaborar una cimentación para una estructura determinada. Debe observar el tipo suelo como parte del problema por resolver y con responsabilidad, analizar cada una de sus características para seleccionar el tipo de cimentación adecuada.

Dentro de los tipos de cimentación se encuentra el sistema de losa flotante. Esta es conveniente cuando el suelo presenta características como: baja resistencia a la capacidad de carga o bien deformaciones considerables, que violan las normativas existentes, en donde, sistemas como la placa corrida y la placa aislada resultan ineficientes, o bien en lugares donde exista riesgo de estabilidad.

La teoría relacionada con los cimientos forma parte de la geotecnia. Esta considera conceptos de falla, capacidad soportante última y admisible, deformaciones en el suelo, según sean sus características. Aunque, para que el diseño cumpla con todos los requerimientos es necesario realizar un análisis estructural que defina las proporciones de los recursos adecuados como: el acero y el concreto; además, definir las secciones correspondientes que garanticen la seguridad de la estructura, como de los usuarios, según lo dispuesto en nuestro código.

Ante los parámetros definidos en el diseño geotécnico y estructural, mostrados en las especificaciones del Código de Cimentaciones de Costa Rica (CCCR) y el Código Sísmico de Costa Rica 2002 (CSCR-2002), el proyecto busca facilitar el análisis y diseño de losas para fundaciones rígidas mediante la realización de un programa computacional, que colabore con el

análisis del cimiento y el diseño de las dimensiones del mismo, mediante la determinación de la estabilidad, los asentamientos del suelo y del área mínima requerida, además del refuerzo de cada una de las sub-losas que conforman el cimiento, dependiendo del ancho y largo determinados. Así como el diseño de vigas de fundación.

Con el fin de alcanzar esta meta, se definen los siguientes objetivos específicos:

1. Definir los parámetros geotécnicos para determinar la capacidad de carga.
2. Definir el área de losa necesaria para transmitir adecuadamente las cargas que actúan sobre el cimiento.
3. Analizar la estabilidad de la losa.
4. Analizar los asentamientos que se presentan en el suelo donde descansa el cimiento.
5. Calcular el refuerzo de acero necesario para que una losa soporte las acciones que se presentan sobre ella. (Flexión y cortante)
6. Calcular las dimensiones que requiere las vigas de fundación o nervaduras en una losa de fundación.
7. Calcular el refuerzo de acero necesario para las vigas de fundación.

El alcance de estas metas se realizó por medio de consultas bibliográficas en donde cada tema se analizó, resumió, e interpretó para la definición de los parámetros necesarios. Con estos, se elaboraron los respectivos diagramas de flujo, que a su vez, definieron la secuencia del programa computacional. Posteriormente se procedió a diseñar la interfase más adecuada para cada tema.

Definido lo anterior se realizó la integración de cada tema para la elaboración del programa como una unidad.

Al finalizar el estudio se obtuvo una herramienta computacional que colabora con el análisis y diseño de losas para fundación. Este, permitirá obtener resultados confiables en menor tiempo, que si se realizarán a mano.

Metodología

En el análisis y diseño de losas rígidas para fundaciones fue necesario conocer:

- La capacidad de carga admisible del suelo.
- El área requerida por la losa para transmitir las carga al suelo.
- La estabilidad de la estructura ante las cargas permanentes, temporales y laterales presentes.
- Los asentamientos de los estratos sobre los cuales se encuentra descansando la losa para fundación.
- Las dimensiones de la losa y las cargas que actúan, para definir el refuerzo de acero necesario.
- Y por último, las vigas de fundación para cuando el diseñador así lo requiera.

La herramienta computacional utilizada para la solución de cada una de las necesidades citadas anteriormente fue el programa de Visual Basic.Net 2003.

El programa se estructuró en dos secciones: análisis y diseño. Dentro de la sección de análisis, se consideran los siguientes aspectos:

1. La determinación de la capacidad de soporte última del suelo, mediante el ingreso de las características del suelo y de la sección.
2. El área requerida para una losa de forma rectangular, de "L" y de "T". En este caso se debe de seleccionar primero la geometría de la sección, luego introducir las cargas, la presión admisible del suelo y después las dimensiones de la sección.
3. Los asentamientos del suelo, según las propiedades del mismo, la carga aplicada y las dimensiones de la losa rectangular.
4. El factor de seguridad contra el volcamiento, ingresando las cargas

actuantes y definiendo el tipo de suelo.

Mientras que la parte de diseño, involucra:

1. El diseño de una losa, en donde se debe definir el tipo de sección global por diseñar (rectangular, "L" o "T"), las cargas que originan las presiones en la losa, la ubicación de la losa que se pretende diseñar dentro de la losa global, para identificar las presiones que actúan sobre ella, las dimensiones de la losa por diseñar, y las propiedades de los materiales.
2. El diseño de vigas de amarre, donde se deben de considerar las acciones últimas para el diseño, como las dimensiones de la viga y las propiedades de los materiales.

La capacidad de carga admisible del suelo se determinó bibliográficamente. Para tal efecto se consultaron diversas fuentes sobre mecánica de suelos, entre ellos el libro titulado *Mecánica de suelos* de Peter Berry. También se consultaron fuentes sobre cimentaciones de Braja Das, y el *Código de Cimentaciones de Costa Rica (CCCR)*, entre otras.

Conocidos los requerimientos para definir la capacidad de carga última del suelo, se elaboró un diagrama de flujo con la intención de solucionar el problema, y así poder construir la interfase adecuada, con el código correspondiente para elaborar el programa.

En el desarrollo de la interfase se consideró el ingreso de datos básicos como: el ancho de la cimentación, la cohesión del suelo, la profundidad a la que se encuentra el cimientto (nivel de desplante), la distancia a la que se encuentra el nivel freático o del agua desde la superficie del terreno, los estratos por analizar, considerando su espesor y peso específico. Con estos datos se realizó el cálculo de los factores de corrección por

excentricidad y por la forma de la sección, considerando, a su vez, el ancho y el largo definido.

El cálculo de los factores de carga (N_v , N_c , N_q), consideró la situación de falla local o global del suelo donde descansa la losa. Esta consideración es reflejada en el valor del ángulo de fricción interna.

Los valores respectivos de los factores de carga se determinaron con la ayuda de la Figura 4.2 del CCCR (Véase anexo 1). En estas curvas presentadas fueron aproximadas mediante la ayuda del programa de Microsoft Excel 2003, con su función de ajuste de curvas. Además, se definieron ecuaciones para las curvas de Meyerhof y Bell, mediante la recolección de puntos de los valores del ángulo de fricción interna y sus respectivos valores de los coeficientes de capacidad de carga, con los que se insertaron en Microsoft Excel 2003.

En el cálculo de los factores de carga, el usuario puede elegir si realizarlo con las ecuaciones encontradas, o bien, introducir los datos tomados por él de la figura respectiva.

También fue considerada la condición de falla local que afecta la cohesión del suelo.

En la determinación de la sobrecarga debida al peso del suelo ubicado por arriba del nivel de desplante, se contempla el caso de que el nivel de desplante quede entre un estrato o en los límites del mismo.

Con la ubicación del nivel del agua se considera el estado del suelo, si es húmeda o saturada.

La definición de estos valores permitió aplicar la fórmula para el cálculo de la capacidad de soporte última del suelo, y así lograr definir este valor.

En el caso del área requerida por la losa para transmitir adecuadamente las cargas al suelo, se consideró lo definido por el CCCR, quien define parámetros para la distribución de esfuerzos sobre el elemento dependiendo de un área definida. (Al respecto se consultó el libro "Diseño de Estructuras de Concreto Reforzado", A. Nilson) Según lo definido por el CCCR se procedió a elaborar el diagrama de flujo que llevó a la solución del problema y al desarrollo de la interfase.

En esta sección se consideró el cálculo para una sección rectangular, con forma de L y con forma de T. Además, en cada caso el peso de la losa es considerado.

Aquí se construyó una interfase en donde el usuario debe ingresar los datos de las cargas actuantes con su respectiva ubicación. Estas no son afectadas por ningún factor que amplifique su acción.

En este caso, lo que se realiza es la identificación de esfuerzos máximos y mínimos transmitidos al suelo, para ser comparados con el esfuerzo admisible del suelo.

La determinación de la estabilidad de la losa se define consultando el CCCR, en su sección 6.3. Esta hace referencia al factor de seguridad contra el volcamiento, el cual involucra cargas verticales y laterales sobre la losa que el usuario debe introducir con el fin de identificar los momentos que proporcionan estabilidad y volcamiento en la estructura.

Una vez definido este valor, se procede a comparar el factor de seguridad contra el volcamiento definido por el CCCR, en su página 114, dependiendo del tipo de suelo en donde se ubique la cimentación.

Los asentamientos de los estratos de suelo en los que descansa la losa fueron determinados según lo investigado en el CCCR. Según este, la losa debe considerarse como una sección rectangular, las propiedades del suelo como la relación de vacíos inicial (e_0), el índice de compresión (C_c), el espesor de las capas de suelo, su peso volumétrico y esfuerzos. Estos, a su vez, definen como realizar el cálculo para determinar los asentamientos para cada estrato y para el asentamiento total. Al respecto, el programa contempla la condición húmeda o saturada del suelo, así mismo el caso cuando el nivel de desplante se encuentra en el límite de un estrato o bien entre este.

En relación con las dimensiones de las losas, el diseñador es el encargado de seleccionar el tamaño requerido bajo su criterio, o bien según las exigencias de la estructura. También el ancho, el largo y el espesor, y con la ayuda del programa llega a definir el refuerzo de acero necesario. Estas disposiciones están fundamentadas en la fuente titulada *Diseño de Estructuras de Concreto Reforzado*, específicamente en el método de los coeficientes definido por el ACI, en su sección 12.6 sobre el diseño de losa en dos direcciones. Aquí se indica que el diseño de una losa que trabaja en una dirección se realiza como una viga simplemente apoyada. Otra fuente de apoyo fue el CSCR-2002, específicamente en la sección de

elementos de concreto reforzado, esto para definir los valores máximos y mínimos de acero y para calcularlos, desarrollando de esta manera el diagrama de flujo respectivo.

En el diseño de la losa, se debe de ingresar los valores de las cargas permanentes y temporales sobre la losa de fundación, con su respectiva ubicación. Estas son combinadas mediante la ecuación II, definida por CSCR-2002. En este caso la carga de sismo no es considerada, por lo que es criterio del diseñador el tomar en cuenta la influencia de esta fuerza en las presiones que se transmiten al suelo.

Con estas cargas, el programa calcula la presión sobre el suelo producto del peso de la estructura. Aquí el usuario define la ubicación por medio de pares ordenados de la sub-losa que desea diseñar dentro de la losa de fundación global.

Además, se seleccionan los puntos para la determinación de las presiones máximas y mínimas, de donde se obtiene el valor del factor de reducción para la capacidad de soporte última del suelo, Esto para comparar el esfuerzo máximo debido al peso de la estructura en la sub-losa, con la capacidad de soporte admisible del suelo.

Luego se procede al diseño de la losa, según su comportamiento, características de los materiales y dimensiones, en donde se considera el espesor mínimo para una losa en una dirección de $1/20$ del largo de losa para el caso de una condición de apoyo simple, que es la condición supuesta para el diseño del elemento², mientras que para el caso de la losa en dos direcciones, el espesor mínimo se considera de $1/180$ del perímetro de la sección.³

Y por último, para las vigas de fundación se investigó en libros de diseño estructuras y de cimentaciones, además se contemplaron las regulaciones indicadas por el CSCR-2002, en su sección de elementos de concreto reforzado para definir los valores máximos y mínimos de acero.

En el caso de las vigas, el usuario debe definir la ubicación y las cargas últimas por considerar para el diseño de la viga de amarre. Además se consideraron dos situaciones con

respecto al diseño por cortante del elemento, uno cuando no existen aros y el cortante es absorbido por la resistencia del concreto y otro cuando se desea colocar aros, para los usuarios que crean la necesidad de estos.

Reunida toda esta información se elaboró una herramienta computacional para el análisis y el diseño de losas para fundaciones mediante el lenguaje de Visual Basic.net 2003.

² Nilson, Arthur H. "Diseño de Estructuras de Concreto", pág. 369

³ Nilson, Arthur H. "Diseño de Estructuras de Concreto", pág. 382

Marco Teórico

Losas para fundación

La cimentación es el elemento estructural encargado de transmitir una carga al suelo o roca donde se encuentre la estructura. Esta parte de la estructura comúnmente está por debajo del nivel del terreno y transmite la carga directamente a un estrato resistente.⁴

En las construcciones con acero, mampostería o concreto, se distinguen dos tipos: las cimentaciones superficiales y las cimentaciones profundas. Esta clasificación se da debido a la profundidad a la que se encuentre la subestructura.⁵

Las cimentaciones superficiales son aquellas en las que la relación nivel de desplante-ancho del cimiento (D_f / B) es menor o igual a 1. Dentro de estas se pueden encontrar las placas aisladas, las placas corridas y las losas para fundación.⁶

Una losa de cimentación es un elemento que se acostumbra que sea rígido, abarcando toda el área de la estructura y soportando las cargas transmitidas por las columnas y los muros. Estas son comunes en suelos con baja capacidad de soporte o cuando se requiere restringir los asentamientos diferenciales. La rigidez de la losa es proporcionada por el conjunto de vigas y losas.⁷

Entre los tipos más comunes de losas para fundación se tienen:⁸

- La placa plana (Figura 2), losa con espesor uniforme.
- La placa plana con mayor espesor bajo las columnas. (Figura 3)

- Vigas y losas. (Figura 4)
- Losas con muros de sótano como parte de la placa. (Figura 5)

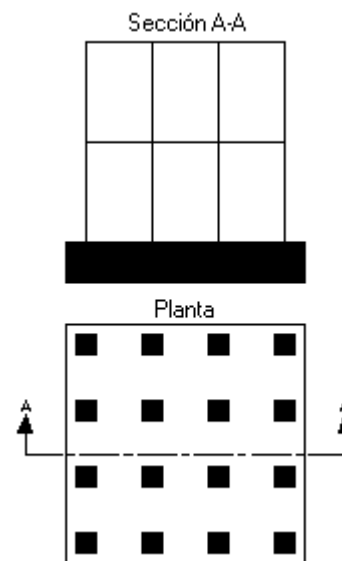


Figura 2. Losa plana

⁴ Nilson, Arthur H.. Diseño de Estructuras de Concreto, pág. 499

⁵ Código de Cimentaciones de Costa Rica, pág. 41

⁶ Código de Cimentaciones de Costa Rica, pág. 42

⁷ Berry, Peter L. Mecánica de suelos, pág. 322

⁸ Braja, Das. Cimentaciones, pág. 297

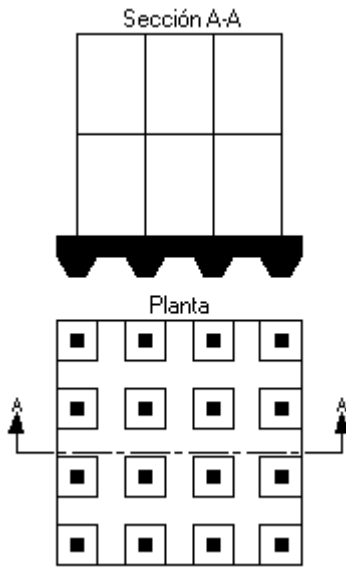


Figura 3. Losa plana con mayor espesor bajo las columnas

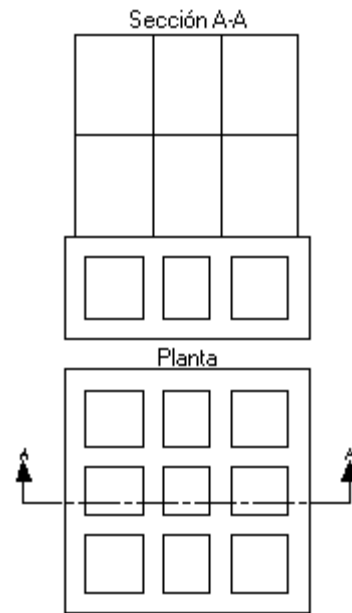


Figura 5. Losas con muros de sótano como parte de la placa

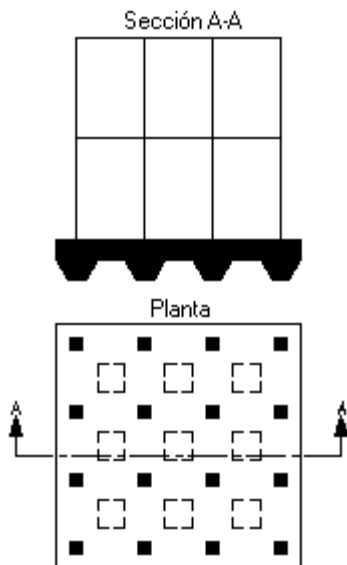


Figura 4. Vigas y losas

Cargas sobre la losa

Ciertas construcciones suelen transmitir las cargas que actúan sobre los muros de forma vertical a una losa flotante (o de fundación), la cual es soportada por el suelo subyacente con una presión hacia arriba.

Las cargas transmitidas por la construcción al cimiento, son producto de acciones externas. Por tanto, según nuestro Código Sísmico 2002, se deben considerar las cargas verticales sobre la estructura como también las carga laterales presentes.

Como verticales el CSCR-2002, contempla las originadas por el peso propio de la estructura o bien por elementos que se encuentren en esta, de forma permanente, las cuales se denominan cargas permanentes. Además, de estas se presentan las cargas debido a la utilización de la edificación o cargas de servicio, que se acostumbra llamar cargas temporales. Por otra parte, las cargas laterales consideradas son la fuerza debido a un sismo, el empuje lateral del suelo debido a la presión de los líquidos que se encuentran dentro de este y el efecto del viento sobre la estructura.

La determinación de las cargas permanentes sobre la estructura se fundamenta

en las propiedades de los materiales y de la sección de los elementos que conforman la estructura.

Las cargas temporales son definidas por medio del análisis del servicio al cual va a estar sometida la estructura; para lo cual nuestro CSCR-2002 define parámetros básicos. Estos se muestran en la tabla 1, indicando valores de carga temporal para determinados usos.

Mientras que el valor de la carga sísmica se determina consultando los capítulos del 2 al 7 del CSCR-2002. Y la fuerza de viento según lo indicado en el reglamento de construcciones, en su apartado para cargas debidas al accionar del viento.

Para efectos del diseño, el CSCR-2002 indica que las cargas que se presentan en la estructura deben ser afectadas por coeficientes que amplifican (aunque en ocasiones reducen) los valores de las cargas, y combinadas estas, se establece un valor de carga última.

La utilización de los coeficientes, se debe a las posibles variaciones en las propiedades de los materiales, defectos constructivos y otros aspectos; mientras que la combinación de las cargas se da para considerar las posibles acciones de los diferentes tipos de cargas en un momento dado.

Tabla 1. Cargas temporales unitarias mínimas⁹

Destino del piso	Carga Temporal (kg/m²)
Habitación (casas de habitación, apartamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, edificios para internados en escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares).	200
Oficinas, despachos, laboratorios, salones de lectura, aulas, salas de juego y similares.	250
Escaleras, rampas, vestíbulos, pasajes de libre acceso al público.	400
Lugares de reunión desprovistos de asientos fijos, estadios, salones de baile, etc.	500
Bibliotecas, salones de archivo.	500
Lugares de reunión con asientos fijos, templos, cines, teatros, gimnasios, etc.	400
Comercios, bodegas y fábricas de mercancía ligera.	500
Comercios, bodegas y fábricas de mercancías con peso intermedio.	650
Comercios, bodegas y fábricas de mercancía pesada.	800
Techos de fibrocemento, láminas de acero galvanizado y otros.	40
Azoteas con pendiente superior a 5 por ciento.	100
Azoteas con pendiente inferior a 5 por ciento.	200
Voladizos en vía pública (marquesinas, balcones y similares).	300
Garajes y aparcamientos (para automóviles exclusivamente).	300

⁹ Tomado del CSCR-2002

El Código Sísmico de Costa Rica 2002 (CSCR-2002), en su capítulo 6, establece cuatro combinaciones de carga para estimar las posibles cargas últimas que pueden actuar sobre la estructura. Estas combinaciones son las que se detallan a continuación:

$$CU = 1.4 CP \quad (1)$$

$$CU = (1.2 CP + 1.6 CT) + 1.6 CE \quad (2)$$

$$CU = 1.05 CP + f_1 CT \pm CS + CE \quad (3)$$

$$CU = 0.95 CP \pm CS + CE \quad (4)$$

Donde:

CU = carga última.

CP = carga permanente.

CT = carga temporal.

CS = carga de sismo.

CE = carga de empuje de tierras.

Y donde el factor f_1 (factor de escala de cargas gravitacionales), está dado por:

$f_1 = 0,5$ para edificaciones de baja probabilidad de ocupación plena de carga temporal a la hora del sismo.

$f_1 = 1,0$ para edificaciones de alta probabilidad de ocupación plena de carga temporal a la hora del sismo, tales como: bodegas, sitios de reunión pública, estacionamientos públicos, etc.

$f_1 = 0,0$ para techos

Premisas del diseño del concreto reforzado

En el diseño de estructuras de concreto reforzado es necesario considerar las siguientes suposiciones:¹⁰

1. Las fuerzas internas (momentos de flexión, fuerzas cortantes y esfuerzos normales y cortantes), están en equilibrio con las cargas externas en la sección.
2. La deformación unitaria de una barra de refuerzo embebida es la misma que la del concreto que la circunda, lo que quiere decir

que se supone que existe una adherencia perfecta entre la interfase del concreto y el acero.

3. Las secciones transversales planas antes de la aplicación de las cargas permanecen planas cuando el elemento se carga.
4. Debido a que la resistencia a la tensión del concreto es pequeña comparada con su resistencia a la compresión, se supone en general que el concreto no es capaz de resistir esfuerzos de tensión.
5. La teoría se basa en las relaciones esfuerzo – deformación reales y en las propiedades de los materiales (concreto y acero).

Análisis y diseño de losas para fundación

La losa de fundación es simplemente una losa de piso sobre nervaduras, únicamente que la carga empleada es la reacción del suelo ante todos aquellos pesos gravitacionales mayorados más el efecto del sismo por el edificio. Además la disposición del acero de refuerzo debe de invertirse a la habitual, el superior por el inferior y viceversa.¹¹

Este tipo de cimiento está compuesto por dos elementos, la losa y las vigas de amarre. La función de las vigas es dar rigidez a la losa para transmitir las cargas al suelo, uniformemente. Además de resistir determinadas cargas si fue necesario (momento, cortante).

El análisis y diseño de una losa de cimentación se realiza determinando las acciones que se presentan en el centroide del área del cimiento, sin ser afectadas por coeficientes de amplificación.¹²

Con esto se debe verificar que la capacidad de soporte del suelo sea mayor o igual a los esfuerzos que genera la estructura ($q_{adm} \geq q_{m\acute{a}x}$), esto determina el área requerida. Seguidamente, es necesario inspeccionar la estabilidad de la estructura, donde las fuerzas que provocan el volcamiento en la estructura deben ser menores a las fuerzas que dan estabilidad de la misma.

¹⁰ Nilson, A. "Diseño de Estructuras de Concreto Reforzado", pág. 19

¹¹ Código de Cimentaciones de Costa Rica, pág. 66

¹² Código de Cimentaciones de Costa Rica, pág. 67

Además, es necesario considerar los asentamientos que se presentan en el suelo, por lo que se deben realizar las estimaciones respectivas para definir estos valores. Debido a que si los asentamientos totales que se presentan son mayores a los permitidos, es necesario variar las dimensiones de la losa, siendo así los asentamientos el criterio que domina el diseño.¹³

Por lo tanto, el diseñador debe definir la ubicación de las vigas de fundación con la finalidad de dar rigidez a la losa.

Una vez definidas las vigas de amarre se procede a determinar las características de la placa, entonces se determina su largo, ancho, espesor y refuerzo de acero necesario para soportar las cargas últimas definidas por las combinaciones de carga del CSCR-2002. Esto permite determinar el esfuerzo máximo y mínimo al que va a estar sometida la sub-losa y realizar su respectivo diseño.

Para soportar las cargas últimas resultantes de las cuatro combinaciones de carga última del CSCR-2002 se debe cumplir con:

$$q_{u \max} \leq \phi q_n \quad (5)$$

donde $q_{u \max}$ es la presión última máxima transmitida al suelo sobre el sitio de cimentación y q_n es la capacidad de soporte nominal del suelo según los parámetros en el sitio. Los factores ϕ de reducción de resistencia se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Factores ϕ de reducción para la capacidad soportante de los suelos

Combinaciones Ecs. 6-1 y 6-2	ϕ
$\frac{q_{u \min}}{q_{u \max}} \geq 0.25$	0.50
$\frac{q_{u \min}}{q_{u \max}} < 0.25$	0.60
Combinaciones Ecs. 6-3 y 6-4	ϕ
$\frac{q_{u \min}}{q_{u \max}} \geq 0.25$	0.67
$\frac{q_{u \min}}{q_{u \max}} < 0.25$	0.83

donde:

$q_{u \max}$ y $q_{u \min}$ son las presiones últimas, máxima y mínima respectivamente en el suelo, que se calculan suponiendo una distribución lineal de ellas, siempre y cuando se cumplan los requisitos de rigidez que establece el Código de Cimentaciones. Para la determinación de ϕ , el valor de la capacidad de carga del suelo considera el peso de la losa, pero para el diseño de la losa este no es considerado.

En el caso de las vigas se diseñan para que la flexión sea soportada por el concreto y el acero, mientras que el cortante por el concreto, o bien, por el acero según la necesidad. Además de considerar las cargas transmitidas a estas por la losa subyacente, para definir los criterios de diseño.

Rigidez de la losa.

La rigidez de la losa es determinada por medio de la siguiente fórmula:

$$L \leq 1.75 \sqrt{\frac{EI}{KB}} \quad (6)$$

En donde:

L : longitud de los vanos.

E : módulo de elasticidad del concreto.

I : inercia de la sección.

K : módulo de reacción vertical del suelo.

B : ancho del cimiento.

¹³ Código de Cimentaciones de Costa Rica, pág. 67

O bien,

$$L \leq 0.884 \sqrt{\frac{EI}{KB}} \quad (7)$$

Con el cumplimiento de estas ecuaciones se logra definir la losa como una estructura rígida.

Capacidad de soporte admisible del suelo

La determinación de la capacidad de soporte admisible del suelo se realiza por medio de la ecuación 4.2 del CCCR, como se muestra a continuación:

$$q_{ult} = \frac{\gamma_1 B}{2} N_\gamma + c N_c + \gamma_2 D_f N_q \quad (8)$$

en donde:

q_{ult} : Capacidad de soporte última (ton/m²).

B : Ancho mínimo de la cimentación (m).

c : Cohesión del material (ton/m²)

γ_1 : Peso volumétrico del suelo bajo el nivel de desplante (ton/m³).

γ_2 : Peso volumétrico del suelo por encima del nivel de desplante (ton/m³).

D_f : Profundidad de la cimentación (en el caso de sótanos es la mínima) (m).

N_γ, N_c, N_q : Factores de capacidad de carga.

La ecuación 8, se encuentra integrada por tres términos, el primero que hace referencia a la resistencia para soportar cargas, debido a la geometría de la sección, el segundo a la resistencia producto de la cohesión de las partículas del suelo, y el tercero se refiere a la resistencia debida a la profundidad a la que se encuentra la cimentación.

Los factores de capacidad de carga son obtenidos de la Figura 4.2 del CCCR (Véase, anexo 1), que presenta las curvas características para cada valor, los que dependen del ángulo de fricción interna del suelo. (Véase anexo 1, o bien, la Figura 6)

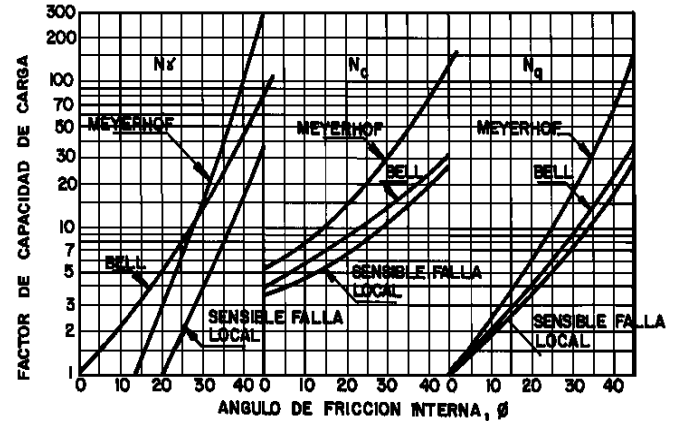


Figura 6. Factores de capacidad de carga para la ecuación general de capacidad de carga¹⁴

Además, en este diseño se debe considerar la condición de falla del suelo, la que puede ser local o global, dependiendo de si el ángulo de fricción interna del suelo (ϕ) es menor o igual a 25°, o bien, que la resistencia a la compresión simple (c), sea menor o igual a 0,5 kg/cm². Si estas condiciones se presentan, el tipo de falla es local, esto implica realizar las siguientes correcciones:

$$\text{Si } \phi \leq 25^\circ, \rightarrow \phi' = 2/3 \phi. \quad (9)$$

$$\text{Si } c \leq 0,5 \text{ kg/cm}^2, \rightarrow c' = 2/3 c. \quad (10)$$

Por lo contrario el tipo de falla presente es la global, entonces no requiere realizar correcciones para el ϕ y c .

Como caso particular se presenta la determinación de la q_{ult} para la condición de suelos finos saturados, en este caso el cálculo se realiza por medio de la siguiente expresión:

$$q_{ult} = 5.7c + \gamma D_f \quad (11)$$

En donde los valores para los factores de capacidad de carga, cuando $\phi = 0$ son: $N_c = 5,7, N_q = 1, N_\gamma = 0$.¹⁵

Según el CCCR, la ecuación 1 debe ser corregida por factores de forma, presencia del nivel freático y carga excéntrica.

¹⁴ Código de Cimentaciones de Costa Rica, pág. 49

¹⁵ Braja, Das. Cimentaciones, pág. 298

Respecto a los cimientos de forma rectangular el CCCR, en su página 51, indica que los valores de N_c , N_γ deben ser corregidos de la siguiente manera:

$$N_c' = N_c \left(1 + 0.2 \frac{B}{L} \right) \quad (12)$$

$$N_\gamma' = N_\gamma \left(1 - 0.4 \frac{B}{L} \right) \quad (13)$$

En presencia de carga excéntrica el CCCR, en su página 54, indica que se deben reducir las dimensiones de la cimentación de la siguiente manera:

$$B' = B - 2e_b \quad (14)$$

$$L' = L - 2e_l \quad (15)$$

En donde $e_b \leq B/2$ y $e_l \leq L/2$, y el área efectiva se encuentra definida por $A' = B'L'$.

Si $B/2 > e_b > B/6$ y $L/2 > e_l > L/6$, se debe verificar la seguridad del cimiento contra el volcamiento, sección 6.3 del CCCR.

En presencia de nivel freático, el código indica, en su página 60, que el cálculo de γ_1 y γ_2 se debe realizar considerando la condición húmeda como la satura de los estratos del suelo, por lo que se debe trabajar con los peso específicos efectivos (γ').

Con el valor de la q_{ult} se procede a la determinación de la capacidad de soporte admisible del suelo, mediante la siguiente ecuación:

$$q_{adm} = \frac{q_{ult}}{f_s} \quad (16)$$

El factor de seguridad contra la falla por capacidad de soporte a utilizar debe ser 3, cuando el terreno es de tipo normal o sus propiedades han sido investigadas en forma correcta, de lo contrario se debe recurrir al capítulo 3 del CCCR para su determinación.¹⁶

¹⁶ Código de Cimentaciones de Costa Rica, pág. 61

Área requerida de la losa para fundación

El diseño de la losa involucra la definición de un área requerida para distribuir adecuadamente los esfuerzos de la estructura al suelo, la cual es determinada igualando el esfuerzo efectivo del suelo con el esfuerzo actuante (ecuación 17), resultante de las acciones de las cargas sin mayorar sobre la estructura.¹⁷

$$q_{adm} \geq q_{act} \quad (17)$$

La carga actuante es definida por la ecuación 4.5 del Código de Cimentaciones de Costa Rica, que supone una distribución trapezoidal de los esfuerzos al suelo, cuando la excentricidad de la fuerza resultante sea menor o igual a un sexto del ancho y del largo de la placa. Esta se muestra a continuación:

$$q_{act} = \frac{P}{A_{req}} \left(1 \pm \frac{6e_b}{B} \pm \frac{6e_l}{L} \right) \quad (18)$$

Donde,

q_{act} : carga actuante del suelo (ton/m²).

P : Cargas sobre la estructura (ton).

A_{req} : Área requerida por la losa (m²).

e_b : excentricidad de la carga a lo ancho de la losa (m).

e_l : excentricidad de la carga a lo largo de la losa (m).

B : ancho de la losa (m).

L : largo de la losa (m).

De lo contrario se debe considerar la ecuación 4.6, del mismo código, que supone una distribución triangular de los esfuerzos al suelo, cuando $B/6 < e_b < B/2$ y $L/6 < e_l < L/2$, como se muestra a continuación:

$$q_{act} = K \left(\frac{P}{BL} \right) \quad (19)$$

Donde K es una constante que puede ser obtenida de la Figura 4.3 del CCCR. (Véase anexo 2, o bien, Figura 7)

¹⁷ Código de Cimentaciones de Costa Rica, pág.67

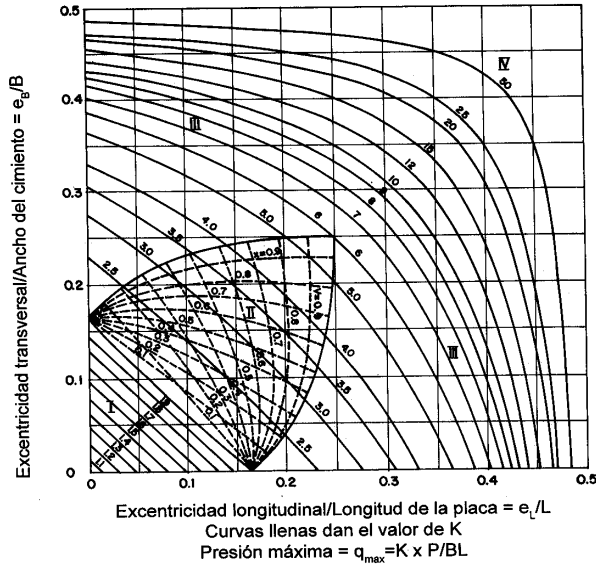


Figura 7. Valor de la constante k para la determinación de esfuerzos

Además de las cargas que actúan sobre la losa, es importante el considerar el peso de la misma para cumplir con la ecuación 17.

La determinación del área es realizada por medio de la prueba y el error, por lo que se debe probar valores de ancho y largo de la losa para que satisfaga la ecuación 17.

Estabilidad de la losa para fundación

Cuando toda la losa se encuentre bajo la acción de la compresión no es necesario revisar esta condición, ya que no existe el peligro de volcamiento, pero, en caso contrario cuando la $e_b > B/6$ o $e_L > L/6$ debe verificarse la seguridad contra el volcamiento por medio de la sección 6.3.c del CCCR.¹⁸

La verificación de esta condición se realiza mediante el análisis de las fuerzas que provocan que la estructura sea estable y las fuerzas que producen volcamiento de la misma,

¹⁸ Código de Cimentaciones de Costa Rica, pág. 54

por medio de una sumatoria de momentos en un extremo de la losa, en donde el momento producto de las fuerzas que dan estabilidad deben de ser mayor que el originado por las fuerzas que producen el volcamiento. Esta relación de momento determina el factor de seguridad contra volcamiento (FS_V). Por lo tanto, si se trata de un suelo granular FS_V debe ser mayor o igual a 1.5, mientras que si se trata de un suelo cohesivo debe ser mayor o igual a 2.¹⁹

$$FS_V = \frac{\sum M_{Estabilizadores}}{\sum M_{volcamiento}} \quad (20)$$

Asentamientos en una losa para fundación

El cálculo de los asentamientos en la losa se realiza mediante la siguiente ecuación:²⁰

$$\Delta H = \sum_0^n \left(\frac{\Delta e}{1 + e_0} \right) \Delta Z \quad (21)$$

Donde,

ΔH : asentamiento del estrato de espesor

H.

e_0 : relación inicial de vacíos.

Δe : variación de la relación de vacíos bajo el incremento de presión vertical Δp inducido a la profundidad Z por la carga superficial.

ΔZ : espesor de los estratos en los que el esfuerzo puede considerarse uniforme.

n: número de capas por considerar.

Conocido el valor de los asentamientos totales se debe verificar con los valores del Cuadro 7.1 del CCCR (asentamiento total admisible. Véase anexo 3).

¹⁹ Código de Cimentaciones de Costa Rica, pág. 113

²⁰ Código de Cimentaciones de Costa Rica, pág. 140

Diseño de losas para fundación

En el diseño de la losa se consideran dos casos, según el comportamiento del elemento ante la presencia de las cargas actuantes. Estos casos son: la losa con comportamiento en una dirección y la losa con comportamiento en dos direcciones.

La diferenciación de las losas se da por medio de la relación largo-ancho, por lo tanto si esta es menor a 2, la losa se considera con un comportamiento en dos direcciones, caso contrario en una dirección.

El diseño de los elementos contempla materiales como el concreto y el acero, con sus características a la compresión simple (f'_c) y su esfuerzo de fluencia (f_y).

En el caso de la losa de comportamiento unidireccional se asume una franja unitaria de 1 m, que funciona como ancho unitario para un diseño de una viga sometida a flexión (Véase diseño de vigas para fundación por flexión).

Ahora, cuando la losa se considera en dos direcciones, son diseñadas por medio del método de los coeficientes (Art. 13.5, ACI), el cual define diversos casos dependiendo del estado presente en los extremos, ya sea empotrado o bien libre, definiendo coeficientes para momentos positivos y negativos en la losa debido a la carga permanente y la carga temporal.

En el cálculo de los momentos actuantes en la losa de dos direcciones se utilizaron las siguientes ecuaciones tomadas del código A.C.I (Método de los coeficientes, Art. 13.5):

$$\begin{aligned} a) \text{ en la luz corta } M_{act}^- &= C^- * q_u \cdot l_a^2 \text{ y} \\ M_{act}^+ &= C^+ q_u \cdot l_a^2 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} b) \text{ en la luz larga } M_{act}^- &= C^- * q_u \cdot l_b^2 \text{ y} \\ M_{act}^+ &= C^+ q_u \cdot l_b^2 \end{aligned} \quad (23)$$

donde: l_a = luz corta
 l_b = luz larga
 q_u = presión última en el suelo
 C = coeficiente de momento para carga permanente o temporal.

Conocidos estos valores se calcula el momento último presente en la losa por medio de la combinación de carga última II del CSCR-2002 (Ecuación 2).

Con el momento último definido, se procede a calcular el área de acero necesaria. Esta es comparada con las cuantías mínimas y máximas, según CSCR-2002.

$$a = d - \sqrt{d^2 - \frac{2 * Mu}{0.85 * \phi * f'_c * b}} \quad (24)$$

$$A_s = \frac{a * 0.85 * f'_c * b}{f_y} \quad (25)$$

Donde:

A_s = área requerida de refuerzo

f_y = límite de fluencia del acero

f'_c = límite de fluencia del concreto

b = ancho de la viga

d = distancia desde la fibra extrema en compresión al centroide del refuerzo longitudinal a tracción

a = profundidad del bloque equivalente de esfuerzos

ϕ = factor de reducción de resistencia.

Definida el área necesaria por metro lineal, se procede a calcular el espaciamiento del refuerzo, iterando el número de la varilla a utilizar, por medio de la siguiente ecuación:

$$S = 100 \frac{A_{var}}{A_{s,calc}} \quad (26)$$

Donde,

S : separación entre varillas (cm).

A_{var} : área de acero de la varilla (cm²).

$A_{s,calc}$: área de acero calculado (cm²).

Conocida la separación teórica de las varillas, esta debe ser comparada con las separaciones máximas definidas por el CSCR-2002.

El efecto del cortante de una losa en dos direcciones es revisado por el método de los coeficientes, considerando la relación largo-ancho y la condición de apoyo de la losa.

En el cálculo del cortante actuante en la losa de dos direcciones, se utilizan las siguientes ecuaciones: (método de los coeficientes, ACI art. 13.5)

$$P_u = l_a * l_b * q_u$$

$$V_{ulb} = C_a \frac{P_u}{2l_b}$$

$$V_{ula} = C_b \frac{P_u}{2l_a}$$

donde,

P_u : carga última sobre la losa (kg)

V_{ulb} : cortante último sobre el lado largo

(lb)

V_{ula} : cortante último sobre el lado ancho

(lb)

Y para verificar la resistencia de la losa se utiliza la siguiente ecuación.

$$\phi V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b_w d$$

en donde se debe de satisfacer la siguiente condición:

$$V_u \leq \phi V_c$$

Para losas en una dirección, la separación máxima es 3 veces el espesor o 45 cm, el menor de ellos, mientras que para una losa en dos direcciones es 2 veces el espesor de la losa o 45 cm, el menor de los dos valores.

Además, se debe considerar el acero por temperatura para las dos condiciones de apoyo de las losas, que se define por los siguientes casos:

- Si $f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$, $A_{s_{min}} = 0.002 * t * b_w$
- Si $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$, $A_{s_{min}} = 0.0018 * t * b_w$
- Si $f_y > 4200 \text{ kg/cm}^2$, $A_{s_{min}} = 0.0018 * 4200 / f_y * t * b_w$

Diseño de vigas para fundaciones

Las vigas para fundaciones son diseñadas para flexión y cortante. En donde la resistencia a la flexión es dada por el refuerzo de acero por colocar, en conjunto con el concreto, mientras que la acción de cortante se acostumbra que sea absorbida por el concreto, o bien por el acero si el diseñador lo considera apropiado.

En el diseño de este elemento se debe cumplir:

$$\rho < \rho_{m\acute{a}x} \quad (27)$$

donde ρ es la cuantía de acero de la viga, mientras que $\rho_{m\acute{a}x}$ es 0.025, según el CSCR-2002. Además se debe cumplir con requisitos mínimos de acero que son definidos por CSCR-2002, en su capítulo 8.

Dentro del diseño de las vigas de amarre se consideran las vigas simplemente reforzadas.

El diseño de vigas simplemente reforzadas por flexión involucra las siguientes ecuaciones:

$$a = d - \sqrt{d^2 - \frac{2 * Mu}{0.85 * \phi * f'_c * b}} \quad (28)$$

$$A_s = \frac{a * 0.85 * f'_c * b}{f_y} \quad (29)$$

Donde: A_s : área requerida de refuerzo.

f_y : límite de fluencia del acero.

f'_c : límite de fluencia del concreto.

b : ancho de la viga.

d : distancia desde la fibra extrema en compresión al centro del refuerzo longitudinal a tracción.

a : profundidad del bloque equivalente de esfuerzos.

ϕ : factor de reducción de resistencia.

Las ecuaciones 28 y 29 son válidas siempre que el elemento esté controlado por la tensión.

En el diseño de la viga por flexión, el área de acero mínimo ($A_{s\text{mín}}$) no será inferior al mayor de los siguientes valores (CSCR-2002)

$$\text{a) } \frac{14}{f_y} b_w d \quad (34)$$

$$\text{b) } 0.8 \sqrt{\frac{f'_c}{f_y}} b_w d \quad (35)$$

En el caso del cortante, se tiene que la resistencia del concreto es definido por:

$$V_c = \left\{ 0.5 \sqrt{f'_c} + 175 \rho_w * \frac{V_u d}{M_u} \right\} b_w d \quad (36)$$

Donde:

V_c: resistencia al cortante del concreto

V_u: cortante último en el punto de interés.

M_u: momento último en el punto de interés.

Mientras que la resistencia al cortante del acero se define por:

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S} \quad (37)$$

Donde:

V_s: resistencia al cortante del acero.

S: separación de los aros.

A_v: área de varilla.

Resultados

El resultado del estudio fue una herramienta computacional que ayuda en el análisis y diseño de losas para fundación, ya que permite realizar el análisis de la capacidad de soporte última del suelo, los asentamientos que se presenta en los estratos donde descansa la cimentación, así como la determinación del factor de seguridad contra el volcamiento. Además colabora con la designación del área necesaria para transmitir los esfuerzos de manera adecuada al suelo. También coopera con el diseño de elementos estructurales como lo son las losas para fundación y las vigas de amarre.

El producto de cada una de estas tareas ha sido el programa AD Losas Para Fundación. Este presenta una interfase agradable para el usuario, que le permite ingresar los datos básicos para la realización de cada una de las tareas.

En el programa se identifican dos secciones de operación definidas por menús, uno denominado análisis y el otro diseño.

La operación de análisis se divide en secciones como la determinación de la capacidad de soporte última del suelo, del asentamiento total de las capas debajo del cimiento por consolidación, de la estabilidad de la losa y del área requerida para una sección rectangular, sección con forma de L y sección con forma de T.

También en la sección de diseño se puede realizar la determinación del área del acero y el espaciamiento necesario para soportar las cargas sobre losas rectangulares, ya sea con un comportamiento unidireccional o bien en dos direcciones, considerando espesor mínimos para las losas.

En el caso de losas unidireccionales se considera el elemento como simplemente apoyado para determinar las cargas críticas.

Además del área de acero requerida por una viga de amarre para resistir los efectos de la flexión, el programa ofrece la opción de realizar

un diseño con aros o sin aros, según lo crea conveniente el usuario.

Como resultado de la determinación de la capacidad de soporte del suelo, se obtuvo un grupo de ecuaciones que describen el comportamiento de las curvas de Meyerhof y Bell para la determinación de los factores de carga (N_v , N_c , N_q), en donde se originaron las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones para la curva de Meyerhof:

Para N_v :

$$N_v(\varphi) = 0.1276e^{0.1547\varphi}, 13 \leq \varphi \leq 25 \quad (38)$$

$$N_v(\varphi) = 0.0758e^{0.1767\varphi}, 25 < \varphi \leq 35 \quad (39)$$

$$N_v(\varphi) = 0.0214e^{0.2119\varphi}, 35 < \varphi < 45 \quad (40)$$

Para N_c :

$$N_c(\varphi) = 5.2679e^{0.0425\varphi}, 0 \leq \varphi < 15 \quad (41)$$

$$N_c(\varphi) = 3.5571e^{0.0708\varphi}, 15 \leq \varphi \leq 30 \quad (42)$$

$$N_c(\varphi) = 1.6549e^{0.0960\varphi}, 30 < \varphi \leq 45 \quad (43)$$

Para N_q :

$$N_q(\varphi) = 1.01e^{0.091\varphi}, 0 \leq \varphi \leq 25 \quad (44)$$

$$N_q(\varphi) = 0.34e^{0.1329\varphi}, 25 < \varphi \leq 45 \quad (45)$$

Ecuaciones para la curva de Bell:

Para N_v :

$$N_v(\varphi) = 0.9977e^{0.0814\varphi}, 0 \leq \varphi < 25 \quad (46)$$

$$N_v(\varphi) = 0.4324e^{0.1156\varphi}, 25 \leq \varphi \leq 45 \quad (47)$$

Para N_c :

$$N_c(\varphi) = 3.8935e^{0.0412\varphi}, 0 \leq \varphi \leq 25 \quad (48)$$

$$N_c(\varphi) = 0.832e^{0.0537\varphi}, 15 \leq \varphi \leq 30 \quad (49)$$

Para N_q :

$$N_q(\varphi) = 0.8753e^{0.0804\varphi}, 0 \leq \varphi < 25 \quad (50)$$

$$N_q(\varphi) = 0.6005e^{0.091\varphi}, 25 \leq \varphi \leq 45 \quad (51)$$

Con estas ecuaciones se confeccionaron las tablas 3, 4, 5 que describen las curvas de Meyerhof mediante valores del ángulo de fricción interna, además de la diferencia del residuo al cuadrado (Sr) de los valores del factor de capacidad de carga.

Tabla 3. Curva de Meyerhof. Ángulo de fricción interna vrs N_γ Figura 4.2 CCCR y ecuaciones propuestas

Ángulo de fricción interna	Factor de Capacidad de Carga (N_γ), Figura 4.2, CCCR	Factor de Capacidad de Carga (N_γ), ecuaciones propuestas	Sr
13.00	1.00	0.95	0.002
15.00	1.32	1.30	0.000
17.50	2.00	1.91	0.008
20.00	3.00	2.82	0.034
22.50	4.50	4.14	0.126
25.00	6.40	6.28	0.014
27.50	9.50	9.77	0.074
30.00	15.00	15.20	0.040
32.50	24.55	23.64	0.812
35.00	36.25	36.78	0.277
37.50	60.00	60.45	0.206
40.00	100.00	102.68	7.192
42.50	175.00	174.41	0.353
45.00	300.00	296.23	14.214

**Tabla 4. Curva de Meyerhof. Ángulo de fricción interna
vrs Nc Figura 4.2 CCCR y ecuaciones propuestas**

<i>Ángulo de fricción interna</i>	<i>Factor de Capacidad de Carga (Nc), Figura 4.2, CCCR</i>	<i>Factor de Capacidad de Carga (Nc), ecuaciones propuestas</i>	<i>Sr</i>
0.00	5.40	5.27	0.017
2.50	6.00	5.86	0.020
5.00	6.38	6.52	0.020
7.50	7.00	7.25	0.060
10.00	7.75	8.06	0.095
12.50	9.00	8.96	0.002
15.00	10.42	9.97	0.207
17.50	12.27	12.28	0.000
20.00	14.58	14.66	0.006
22.50	17.50	17.50	0.000
25.00	20.00	20.88	0.780
27.50	25.54	24.93	0.381
30.00	30.00	29.75	0.061
32.50	37.50	37.46	0.001
35.00	46.67	47.63	0.914
37.50	60.00	60.54	0.296
40.00	75.00	76.97	3.869
42.50	100.00	97.84	4.647
45.00	125.00	124.38	0.379

**Tabla 5. Curva de Meyerhof. Ángulo de fricción interna
vrs N_q Figura 4.2 CCCR y ecuaciones propuestas**

Ángulo de fricción interna	Factor de Capacidad de Carga (N_q), Figura 4.2, CCCR	Factor de Capacidad de Carga (N_q), ecuaciones propuestas	S_r
0.00	1.00	1.01	0.000
2.50	1.27	1.27	0.000
5.00	1.64	1.59	0.002
7.50	2.00	2.00	0.000
10.00	2.50	2.51	0.000
12.50	3.13	3.15	0.001
15.00	3.88	3.95	0.006
17.50	5.00	4.97	0.001
20.00	6.00	6.23	0.055
22.50	8.00	7.83	0.030
25.00	10.00	9.83	0.031
27.50	13.182	13.14	0.001
30.00	18.13	18.32	0.039
32.50	25.00	25.54	0.297
35.00	33.13	35.61	6.187
37.50	50.00	49.65	0.125
40.00	65.00	69.21	17.750
42.50	100.00	96.49	12.319
45.00	141.67	134.52	51.123

**Tabla 6. Curva de Bell. Ángulo de fricción interna
vrs N_γ Figura 4.2 CCCR y ecuaciones propuestas**

Ángulo de fricción interna	Factor de Capacidad de Carga (N_γ), Figura 4.2, CCCR	Factor de Capacidad de Carga (N_γ), ecuaciones propuestas	S_r
0.00	1.01	1.00	0.000
5.00	1.50	1.50	0.000
10.00	2.27	2.25	0.000
15.00	3.25	3.38	0.018
20.00	5.00	5.08	0.007
25.00	7.88	7.78	0.009
30.00	14.09	13.87	0.050
35.00	23.63	24.72	1.181
40.00	44.29	44.06	0.050
45.00	80.00	78.54	2.134

Tabla 7. Curva de Bell. Ángulo de fricción interna vrs N_c Figura 4.2 CCCR y ecuaciones propuestas

Ángulo de fricción interna	Coef. De Capacidad de Carga (N_c), Figura 4.2, CCCR	Coef. De Capacidad de Carga (N_c), ecuaciones propuestas	Sr
0.00	4.00	3.89	0.011
5.00	4.83	4.78	0.002
10.00	5.67	5.88	0.045
15.00	7.00	7.22	0.050
20.00	8.90	8.88	0.001
25.00	11.25	10.91	0.118
30.00	13.75	14.18	0.187
35.00	18.13	18.55	0.181
40.00	24.17	24.26	0.009
45.00	32.50	31.74	0.582

Tabla 8. Curva de Bell. Ángulo de fricción interna vrs N_q Figura 4.2 CCCR y ecuaciones propuestas

Ángulo de fricción interna	Coef. De Capacidad de Carga (N_q), Figura 4.2, CCCR	Coef. De Capacidad de Carga (N_q), ecuaciones propuestas	Sr
0.00	1.00	0.88	0.016
5.00	1.50	1.31	0.037
10.00	2.00	1.96	0.002
15.00	2.83	2.92	0.009
20.00	4.00	4.37	0.137
25.00	6.00	5.84	0.025
30.00	9.00	9.21	0.043
35.00	14.09	14.51	0.178
40.00	23.33	22.87	0.208
45.00	36.25	36.05	0.039

Con las ecuaciones que describen las curvas de Bell se confeccionaron las tablas 6, 7 y 8. En estas se consideran los valores del ángulo de fricción interna, y la diferencia del residuo al cuadrado (Sr) de los valores del factor de capacidad de carga.

En el apéndice del documento se adjunta el manual del usuario que describe como se debe

utilizar el programa, la entrada de datos y la salida de los resultados. Además, se adjuntan ejemplos comparativos de la utilización del programa, basado en ejercicios confeccionados manualmente y transcritos de manera electrónica por medio de Microsoft Word y Microsoft Excel 2003.

Análisis de los resultados

El principal resultado fue el programa que se desarrolló. Con este se logran abarcar los objetivos de análisis, como lo es la capacidad de soporte del suelo, en el caso de una cimentación por medio de losa flotante, gracias a la introducción de datos básicos.

También la herramienta lograr definir si las dimensiones de la placa de fundación y el factor de seguridad contra el volcamiento, que indica la estabilidad de la losa; según lo indicado por el CCCR; y permite identificar los asentamientos bajo la placa debidos a las cargas aplicadas al suelo, definiendo el valor total de los asentamientos de cada capa y mostrando el valor del asentamiento total, así permite al usuario comparar estos valores con los normados por el CCCR, en su apartado del capítulo 7 "Deformaciones y Asentamientos".

Además, mediante la sección de diseño, el usuario puede definir los requerimientos de una losa rectangular o bien una sub-losa, según lo defina, ya sean en su tamaño, o bien la cantidad necesaria de acero para poder soportar las carga que se presenten. Esto lo logra mediante la introducción de las cargas que actúan de manera permanente y temporal sobre la estructura de cimentación.

Los resultados presentados por esta sección del programa son elaborados por el método de los coeficientes (Art. 13.5, ACI) y las normativas de diseño estructural para elementos de concreto reforzado del CSCR-2002.

También el usuario puede realizar la determinación de las dimensiones de una viga de amarre, mediante la identificación de las cargas de diseño para las cuales se quiere confeccionar el elemento, bajo la normativa del CSCR-2002. En el apéndice se muestran ejemplos realizados manualmente y llevados a un procesador de texto, o bien por medio de MS-Excel 2003, con la finalidad de comparar estos

resultados con los obtenidos por el programa y lograr evaluar la labor del programa.

Con cada una de estas herramientas se integró el programa para que representara una ayuda en el diseño de losas para fundación.

El programa realizado se fundamenta en una revisión bibliográfica sobre el tema de análisis y diseño de losas para fundación, con la intención de brindar una ayuda a los usuarios, sean estos estudiantes de ingeniería en construcción o profesionales en el área, para el análisis del suelo y la estructura (capacidad de soporte, estabilidad, asentamientos, y área requerida) en el caso de cimentaciones con losas flotantes. También permite el diseño de elementos como las losas y las vigas de amarre requeridas, considerando el efecto de cargas permanentes y temporales, y la segunda combinación para determinar cargas últimas del CSCR-2002.

Respecto a la determinación de la capacidad de soporte del suelo, el cálculo de los factores de capacidad de carga es realizado por el programa mediante las ecuaciones desde la 38 hasta la 45 para el caso de Meyerhof. Al respecto, la tabla 3 muestra que los valores obtenidos de N_y son muy cercanos a los definidos por la Figura 6, debido al comportamiento de la diferencia del residuo al cuadrado (S_r). Este en su mayoría, es próximo cero, lo que significa que describe de forma adecuada a la curva, con la excepción de valores de ángulos de fricción interna mayores o iguales a 40° .

Con la tabla 4, se realiza el mismo análisis para N_c según el valor de S_r , para este caso ocurre lo mismo, los valores del ángulo de fricción interna mayor o igual a 40° tienen un error elevado.

La tabla 5 representa el comportamiento de N_q , en donde el S_r muestra que para valores

del ángulo de fricción interna mayor o igual a 35° , el N_q presenta una variación considerable.

Por otra parte, las ecuaciones desde la 46 a la 51 representan la curva determinada por Bell. En este caso, si se analizan los valores presentados por S_r , se tiene que para la tabla 6, los valores de N_γ son adecuados, con variaciones leves para valores del ángulo de fricción interna menor o igual a 35° .

En la tabla 7 se puede observar que el valor de N_c , determinado por las ecuaciones es muy adecuado debido a que el valor máximo de S_r es 0.582 que es cercano cero.

La tabla 8 muestra el valor de N_q , este es el que mejor se describe al mostrar un valor de S_r igual a 0.208, indicando una aproximación adecuada.

La sección del programa para el análisis de la estabilidad contra el volcamiento y de asentamientos puede ser utilizada también para el análisis de otras estructuras.

El área requerida por la losa de fundación, para el caso de sección rectangular se encuentra regulada por el CCCR, por lo que los resultados indican directamente si el área es adecuada o no, debido a las restricciones dadas

a la excentricidad de la carga, mientras que para los otros caso de sección L y T, se muestran los valores de las presiones en la placa, para que el usuario ejerza su criterio y tome la mejor decisión.

Además se debe tener presente que el diseño de una losa en una dirección se considera como simplemente apoyada, por lo que si se quiere ser más detallado con el cálculo se debe definir el momento y el cortante de diseño bajo las condiciones de apoyo existentes.

Con lo mencionado anteriormente se aprecia que el programa considera varias de las normativas definidas por nuestros códigos, por lo que resulta ser una herramienta adecuada al entorno nacional. Aunque el programa permite trabajar con un solo tipo de unidades especificadas en él, esta consideración se puede ver como una limitante del programa, al no presentar resultados según la normativa internacional.

Conclusiones-Recomendaciones

Se desarrolla un programa que ayuda a realizar el análisis y diseño de losas para cimentación, que considera los siguientes aspectos de análisis y diseño:

- La capacidad de soporte última del suelo.
- El área de la losa necesaria para transmitir las cargas que actúan sobre el cimiento.
- La estabilidad de la losa.
- Los asentamientos que se presentan en el suelo donde descansa el cimiento.
- El refuerzo de acero necesario para que una losa soporte las acciones que se presentan sobre ella.
- Las dimensiones que requieren las vigas de fundación o nervaduras en una losa de fundación, así como el refuerzo de acero necesario para soportar las cargas.

Se determinan ecuaciones que describen las curvas de Meyerhof y Bell para la determinación del factor de capacidad de carga. Estas permiten realizar los cálculos con mayor rapidez.

Con la ayuda de AD Losas para Fundación se llega a determinar:

- El valor de la capacidad de soporte del suelo.
- El área requerida por el cimiento para transmitir las cargas al suelo sin provocar falla en el mismo.
- El factor de seguridad contra el volcamiento.
- Los asentamientos totales del suelo que soporta la losa.
- El refuerzo de acero necesario para soportar las exigencias de carga definidas por CSCR-2002, para una losa de fundación.
-

- El refuerzo de acero necesario para soportar las exigencias de carga definidas por CSCR-2002, para una viga de amarre.
- El espaciamiento del refuerzo para una losa de fundación.

El proyecto representa una guía de las consideraciones para el análisis y diseño de losas para fundación, según las teorías definidas para el estudio geotécnico y estructural de los elementos, y las disposiciones de nuestros códigos. (CCCR, CSCR-2002)

Se desarrolló un programa computacional en el lenguaje de Visual Basic.net 2003, orientado por las disposiciones actuales en nuestro país, sobre el análisis y diseño de losas para fundación.

El programa diseñado trata de ser de fácil uso, agradable y eficaz, en los cálculos que realiza.

Se desarrolla un manual de usuario que ayuda a la utilización adecuada del programa.

Como recomendaciones sobre el programa se dan las siguientes:

- Leer el manual del usuario que ayuda al reconocimiento del programa y su correcto uso.
- Tener en cuenta las disposiciones que establecen los códigos de para el análisis y diseño de losas para fundación y no olvidar que los programas de cómputo, como el que se desarrolló, son herramientas que facilitan esta labor, pero no sustituyen los buenos criterios que debe tener el diseñador.

Limitaciones del programa

Algunas limitaciones del programa “AD Losas para fundaciones”:

- El programa solo sirve para diseñar losas para fundación de forma rectangular, de L o bien de T.
- El programa considera solo la segunda combinación de carga última especificada en el CSCR-2002, para el diseño de losas. Por lo que el diseño se fundamenta cuando predominan las cargas permanentes y temporales en la losa.
- Se debe de verificar que la losa presente una condición de rigidez para poder realizar el diseño con la ayuda del programa.
- El programa es capaz de realizar el diseño de losa para fundación, ya sea considerando el cimiento como un solo elemento o bien compuesto por varios (sub-losas), dado este caso el programa solo puede diseñar una sub-losa a la vez por lo que el diseñador debe indicar la ubicación de la misma según sea su criterio, respetando el sistema de coordenadas definido por el programa.
- En el diseño de vigas de amarre el usuario debe de identificar las cargas últimas.
- El usuario debe verificar la condición de la losa por diseñar.

Apéndices

En este apartado se presenta parte de los resultados y del análisis de resultados, que no fueron mostrados en el desarrollo del informe, no obstante, es importante que el interesado en el tema conozca sobre estos.

Entre estos tenemos los siguientes:

- **Apéndice 1.** El “Manual de Usuario” que muestra cómo se debe utilizar el programa “AD Losa para Fundación”.
- **Apéndice 2.** Ejemplos comparativos, donde se muestran algunos ejemplos realizados manualmente o con MS-Excel 2003, y seguidamente de cada uno de estos ejemplos se muestran las pantallas con los resultados obtenidos con el programa desarrollado.
- **Apéndice 3.** Los diagramas de flujo con los que se desarrolló el programa “AD Losas para Fundación”

Anexos

A continuación se adjuntan cuatro anexos los cuales se encuentran de la siguiente manera:

- **Anexo 1.** Figura 4.2. Factores de capacidad de carga. (Tomado del CCCR, página 49)
- **Anexo 2.** Figura 4.3. Distribución de esfuerzo para cargas excéntricas. (Tomado del CCCR, página 53)
- **Anexo 3.** Cuadro 7.1. Asentamiento total admisible. (Tomado del CCCR, página 143)
- **Anexo 4.** Diseño de refuerzo para una losa. (Tomado del Braja, M “Principios de Ingeniería de Cimentaciones”, página 327)

Referencias

- Asociación Costarricense de Geotecnia. 2002. **CODIGO DE CIMENTACIONES**. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Das, Braja M. 2001. **FUNDAMENTOS DE INGENIERIA GEOTECNICA**. México: Internacional Thomson Editores.
- Das, Braja M. 1999. **PRINCIPIOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES**. México: Internacional Thomson Editores.
- Berry, Peter L. 1993. **MECÁNICA DE SUELOS**. Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. 2003. **CÓDIGO SÍSMICO DE COSTA RICA 2002**. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Nilson, Arthur H., G. 1999. **DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO**. Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A
- Calavera, José. **CALCULO DE ESTRUCTURAS DE CIMENTACION**. España: Cronocolor
- Villón Bejar, Máximo. 2005. **TRABAJANDO CON VISUAL BASIC 6.0**. Costa Rica: Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Ureña, A. 2005. **MANIPULACIÓN DE OBJETOS EN VISUAL BASIC.NET 2003**. Cartago. Comunicación personal.