

## Análisis comparativo técnico - económico de vigas de cimentación rígida y flexible para un edificio de mediana altura

### *Technical - economic comparative analysis of rigid and flexible foundation beams for a medium - height building*

1. Sergio Fernando Machicado Colque
2. Marcelo Delgadillo Zurita

#### Resumen

El presente artículo es un resumen de un trabajo de investigación científica, realizado en el mes de agosto del año 2016 y culminado en el mes de julio del año 2017. En él, se efectuó un análisis comparativo técnico-económico de dos diferentes tipos de cimentaciones: inicialmente, la obtención de las solicitaciones axiales de un edificio de cinco pisos, que da como resultado la modelación en el software estructural Extended Three Dimensional Analysis of Building (ETABS); posteriormente, se realizó el cálculo de las solicitaciones de tensiones, cortantes y momentos de la estructura modelada, para lo que se usó formulas conocidas para el cálculo de cimentaciones rígidas, ábacos para el método de vigas de cimentación flexible (respaldados por la Norma Española EHE-08) y ecuaciones diferenciales ya desarrolladas para el método de vigas de cimentación flexible con el método Hetenyi-Timoshenko.

También se hizo el diseño en hormigón armado de las vigas de cimentación, tanto rígidas como flexibles usando la EHE - 08 (Instrucción de Hormigón Estructural), pues los métodos de cálculo y predimensionamiento de las cimentaciones son realizadas con la Norma Española.

En cuanto al análisis comparativo económico que se realizó en la investigación, se llegó a obtener las cantidades de los materiales que se usarán en la construcción de las cimentaciones que fueron investigadas, consiguiendo una cimentación económica y segura lograda por el método de viga de cimentación flexible Norma Española usando ábacos.

**Palabra clave:** Vigas de Cimentación. Cimentación. Análisis técnico - económico.

#### Abstract

This article is a summary of a scientific research work, carried out in the month of August 2016 and completed in the month of July of the year 2017. In it, a comparative technical-economic analysis of two different types of foundations was carried out: initially in the obtaining of the axial solicitations that results in the modeling in the structural software ETABS (Extended Three Dimensional Analysis of Building), afterwards the calculation of stress, shear and moment stresses was calculated of the modeled structure, for this we used well-known formulas for the calculation of rigid foundations, abacuses for the method of flexible foundation beams supported by the Spanish Standard and differential equations already developed for the method of flexible foundation beams with the Hetenyi - Timoshenko method.

The reinforced concrete design of both rigid and flexible foundation beams was also made using the EHE - 08 (Structural Concrete Instruction), this standard was used because the calculation and pre - sizing methods of the foundations are made with the Standard Spanish.

Regarding the economic comparative analysis that was carried out in the research, to later get to obtain the quantities of the materials that will be used in the construction of the foundations that were investigated, obtaining an economic and safe foundations made by the beam method of flexible foundation Spanish Standard using abacus.

**Keywords:** Foundation beams. Foundation. Technical-economic analysis.

1. Ingeniero Civil. Universidad del Valle La Paz sergiofermach@hotmail.com
2. Ingeniero Civil. Universidad Mayor de San Andrés mdz12001@hotmail.com

## INTRODUCCIÓN

El objetivo del proyecto de investigación es realizar un análisis comparativo técnico-económico de vigas de cimentación rígida y vigas de cimentación flexibles para el diseño de una estructura de cimentación segura y económica para los usuarios.

De esta forma, se analizarán y compararán ambos sistemas de vigas de cimentación rígida o vigas de cimentación flexible a nivel técnico y económico para poder obtener estructuras que cumplan las necesidades técnicas y económicas para su ejecución, efectuando la aplicación de las normas de diseño de edificaciones vigentes. Para que una estructura pueda ofrecer seguridad y trabaje correctamente, tiene que tener una configuración estructural adecuada, siendo el diseño estructural y un análisis técnico económico los aspectos de mayor importancia en un proyecto de obra civil. El estudio de las fundaciones es de vital importancia en todo proyecto estructural.

Para cualquier estructura a proyectar, se debe realizar una adecuada selección del tipo de fundación que se va a utilizar, una mala selección del tipo de fundación y un mal diseño puede causar problemas como ser daños estructurales, reducción de la vida útil de la estructura y posibles inconvenientes con el servicio de las estructuras cimentadas.

Por este motivo, se tendrá que realizar una buena selección y diseño de la cimentación a utilizar. Habiendo analizado previamente los resultados obtenidos en los aspectos técnicos y económicos del diseño estructural de la edificación, se deberá plantear dos distintos tipos de cimentaciones -las vigas de cimentación rígida y las vigas de cimentación flexible- para el diseño y ejecución de una estructura eficiente y segura para los usuarios.

Entonces se podrá decir si es factible el uso y aplicación de vigas de cimentación para el análisis, comparación y diseño de estructuras de cimentaciones rígidas y cimentaciones flexibles a nivel técnico y económico, aumentando la calidad entre ambos diseños.

Podemos indicar el concepto de las vigas de cimentación. Calavera (2003) menciona que:

“Se entiende por viga de cimentación aquel sobre la que apoyan tres o más pilares. La sección transversal puede ser rectangular o bien adoptar la forma de T invertida con economía de hormigón y acero, pero con un mayor coste de encofrados y mano de obra”.

Haciendo referencia a la diferencia entre ambos tipos de cimentaciones, en el libro de se indica que “el problema

esencial es juzgar cuándo la estructura es rígida o flexible en comparación con el terreno y, por lo tanto, cuando los puntos de enlace de la estructura con el cimiento se consideran que no pueden o sí pueden sufrir asentamientos diferenciales entre sí” (Calavera, 2003).

Abocándonos al método de cálculo de viga de cimentación rígida, Camacho y Sempertegui (2009) sostienen que en el método rígido la viga de fundación es asumida infinitamente rígida y por tanto indeformable, de manera que bajo la acción de las cargas descienden sin deformar al terreno, donde la presión de suelo es distribuida linealmente; esta distribución puede ser en línea recta o en una superficie plana. También mencionan que “es aconsejable diseñar vigas de fundación de modo que el centroide de presiones del suelo sea coincidente con la línea de acción de la resultante de las cargas de las columnas (centro de gravedad de la fundación  $e=0$ ). Esto produce una presión de contacto uniforme sobre la totalidad del área y evita la tendencia a la inclinación de la fundación.

## METODOLOGÍA

Podemos partir del método de cálculo de las vigas de cimentación, ya sean éstas rígidas o flexibles. En el cálculo de vigas de cimentación rígida, el libro de Calavera (2003) menciona que cuanto más grande es la inercia del cimiento, éste va a cumplir las siguientes desigualdades y será una cimentación rígida.

$$L_v \leq 0.888 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot E \cdot I}{K_c \cdot b}}$$

$$L_m \leq 1.75 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot E \cdot I}{K_c \cdot B}}$$

En las fórmulas para el cálculo de solicitaciones de las vigas de cimentación rígida, se muestran a continuación el cálculo de tensiones, cortantes y momentos de las cimentaciones rígidas.

$$\sum \sigma_1 = \sigma_1 + L_1 \cdot \Delta \sigma$$

$$\sum N_i = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) \cdot L_T$$

$$\sum M_i = \frac{L_T^2}{6} \cdot (2\sigma_1 + \sigma_2)$$

Donde:

$$N = P$$

$$\sigma_1 \text{ y } \sigma_2 \leq \sigma_{\text{adm. suelo}}$$

Se debe usar la ecuación de Boussinesq para las vigas de cimentación flexible, sobre las cuales Calavera (2003)

afirma que la ecuación de Boussinesq para el asiento en un medio elástico, homogéneo e isótropo, para una placa de diámetro  $d$  es:

$$y = \frac{\pi \cdot \sigma_t \cdot d}{4 \cdot E_t} \cdot \frac{m^2 - 1}{m^2}$$

Donde:

$y$  = asiento

$\sigma_t$  = presión aplicada

$d$  = diámetro

$m$  = módulo de Poisson del suelo

$E_t$  = módulo de elasticidad del suelo.

La ecuación de la elástica se puede observar en el libro de Calavera (2003), quien sostiene que para obtener la ecuación diferencial de la elástica, se parte de la ecuación de la curva de las piezas lineales flectadas:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = - \frac{M}{E_c \cdot J_c}$$

$E_c$  e  $J_c$  son el módulo de deformación del hormigón y el momento de inercia de la sección bruta del cimiento respecto al eje horizontal que pasa por el centro de gravedad c.d.g. de la sección.

$$\frac{dM}{dx} = -V$$

$$- \frac{dV}{dx} = \text{Carga}$$

$$\frac{dV}{dx} = qb - \sigma_1 b$$

Siendo  $b$  el ancho del cimiento.

$$\frac{dV}{dx} = \frac{d^2 M}{dx^2} = qb - \sigma_1 b = b(q - K_c y)$$

$$E_c J_c \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} = -M$$

$$E_c J_c \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} = - \frac{d^2 M}{dx^2} = \frac{dV}{dx}$$

Obteniendo la ecuación diferencial de la elástica:

$$E_c J_c \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} - qb + y K_c b = 0$$

Y obteniendo la ecuación de la unidad elástica:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{4 E_c J_c}{K_c b}}$$

Para las vigas de cimentación flexible o en lecho elástico, la Norma española (EHE) menciona que se hace uso de ábacos desde GT-13 a GT-28 (2003).

A continuación, mostramos el uso de los ábacos para el cálculo de las solicitaciones

1) Hallar la unidad elástica " $\alpha$ "

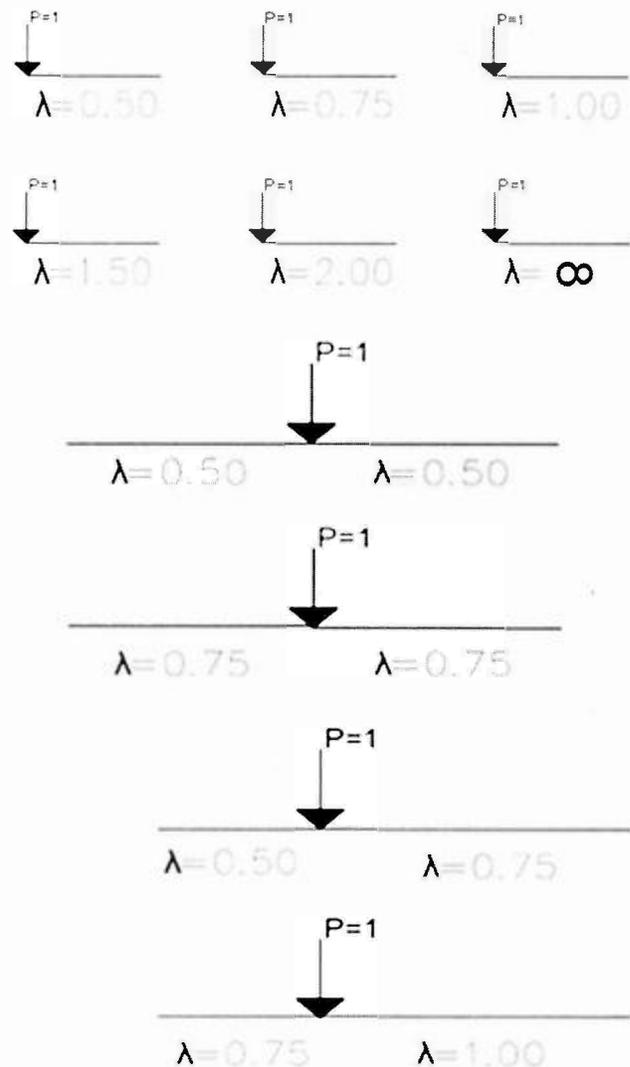
$$\alpha = \frac{\text{Unidad}}{1.75}$$

2) Cálculo de la esbeltez

$$\lambda = \frac{L_T}{\alpha}$$

3) Uso de ábacos

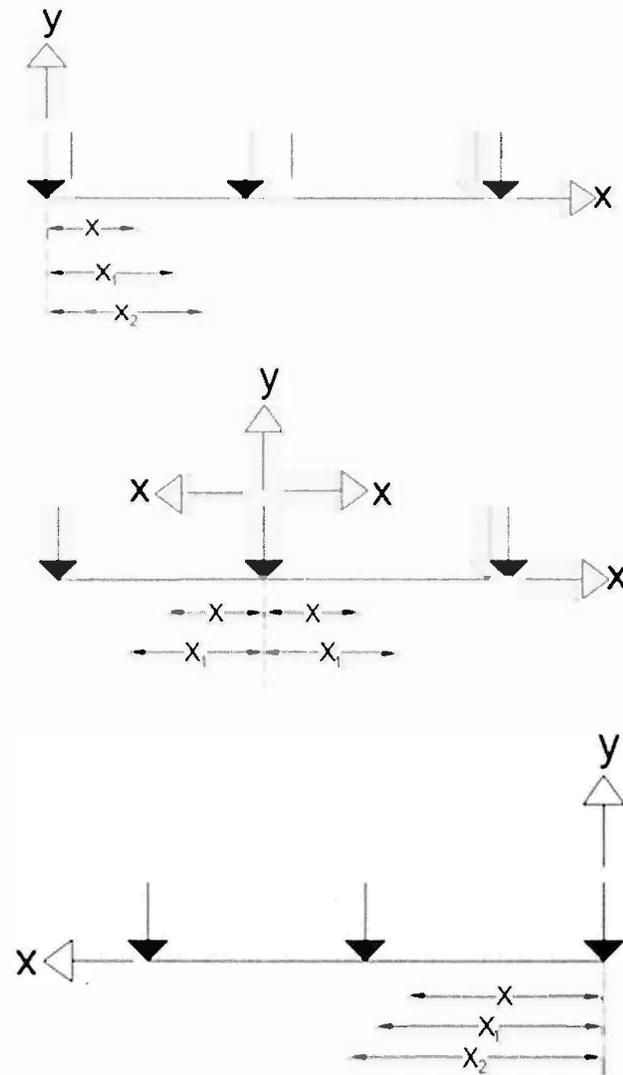
Figura Nº1. Casos donde se sitúa la carga  $P$  para el uso de ábacos



Fuente: Elaboración propia, 2017

4) Discretización

Figura Nº2. Discretización de la Viga de Cimentación Flexible



Fuente: Elaboración propia, 2017

5) Valores finales para obtener las solicitaciones en la Norma Española EHE

$$M = \sum P_{\alpha} \eta_M$$

$$V = \sum P \eta_V$$

$$\sigma = \sum \frac{P}{\alpha} \eta_{\sigma}$$

Para las vigas de cimentación flexible o en lecho elástico, el método de Hetenyi-Timoshenko nos muestra el siguiente proceso de cálculo para hallar las solicitaciones en la fundación flexible:

Determinación de  $\lambda$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{K_c B}{4EI}}$$

Las cargas en los extremos no influyen considerablemente más allá del límite al que corresponde.

$$\varphi = e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \operatorname{sen} \lambda x)$$

$$\psi = -e^{-\lambda x} (\operatorname{sen} \lambda x - \cos \lambda x)$$

$$\theta = e^{-\lambda x} * \cos \lambda x$$

Corte:

$$\mu = \frac{Q_0}{4\lambda} + \psi_{(\lambda x)}$$

$$Q = \frac{-Q_0}{2} + \theta_{(\lambda x)}$$

Momento:

$$M = \frac{M_0}{2} + \theta_{(\lambda x)}$$

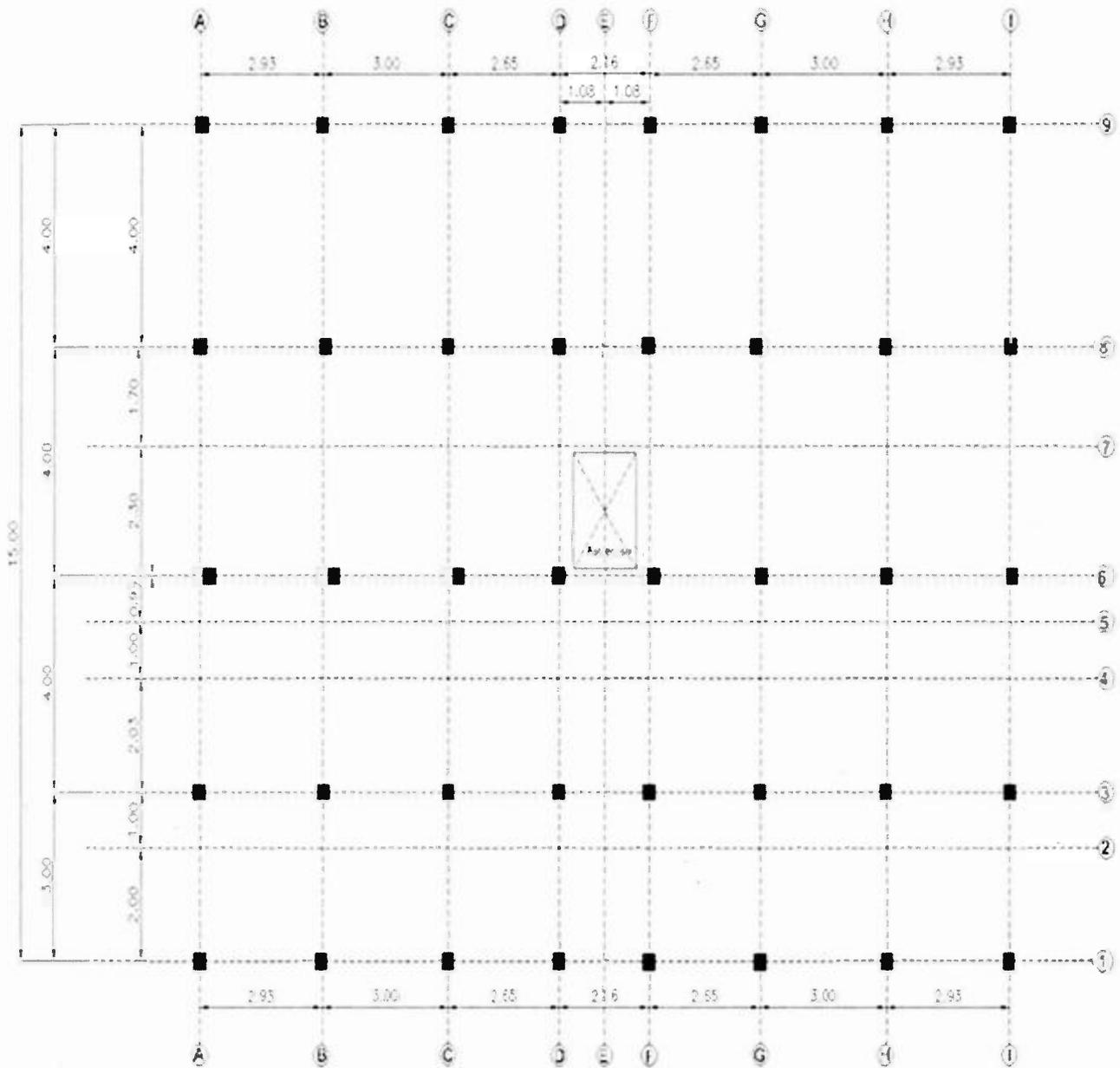
$$Q = \frac{M_0 + \lambda}{2} + \theta_{(\lambda x)}$$

Para realizar el diseño y el posterior análisis técnico económico de las vigas de cimentación planteadas, debemos tener los siguientes datos técnicos:

- Tensión Admisible del Suelo: 0.23 N/mm<sup>2</sup>
- Modulo del Coeficiente de Balasto: 0.04 N/mm<sup>3</sup>
- Fluencia del acero: 4200 [Kg/cm<sup>2</sup>]
- Resistencia característica del hormigón: 210 [kg/cm<sup>2</sup>]

Se realizó un análisis estructural en el software ya citado (ETABS), en el cual se obtuvieron las solicitaciones axiales del edificio modelado que genera la edificación hacia las cimentaciones de dicho modelo.

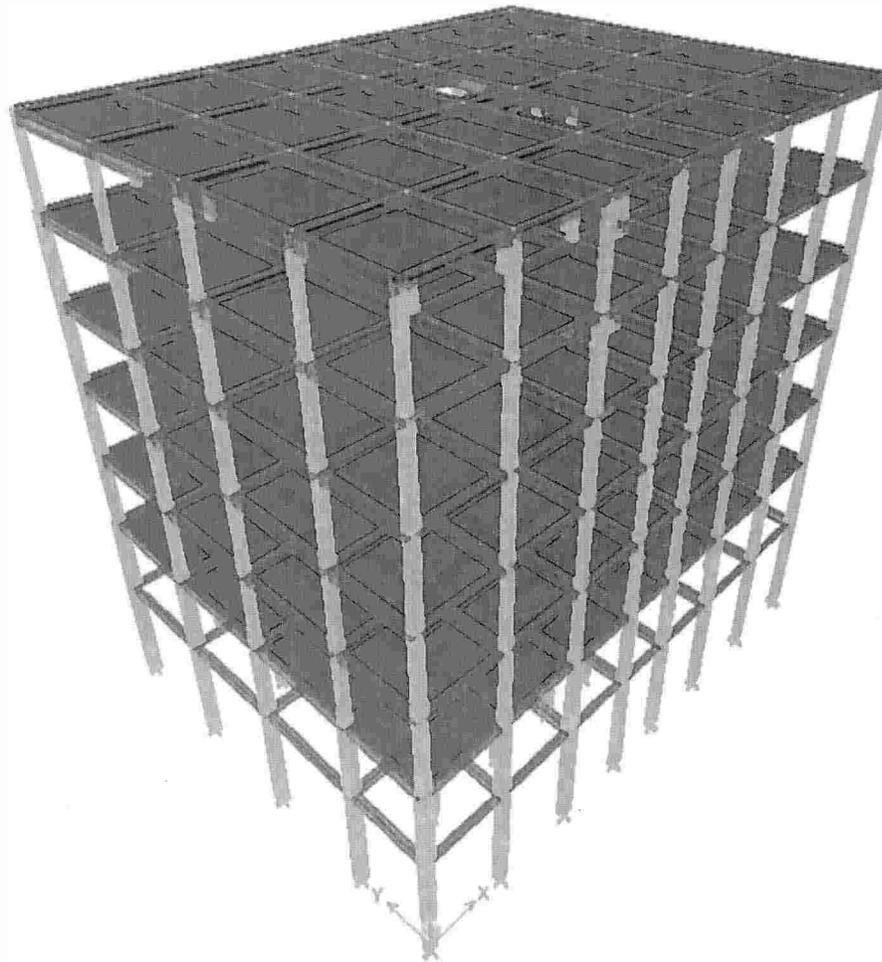
Figura N°3. Vista en planta del plano tipo de la edificación



### PLANTA TIPO DE LA EDIFICACIÓN

Fuente: Elaboración propia, 2017

Figura N°4. Modelado de la estructura en el software estructural ETABS



Fuente: Software estructural ETABS, 2017

### RESULTADOS

En el diseño de cimentaciones de una estructura, se debe optar por la opción que cumpla las normas técnicas implementadas y que sea económica para los usuarios de dicha edificación. A continuación, mostramos los resultados calculados por el software estructural ETABS obtenidos en el eje B, el cual soporta la mayor carga axial de la edificación hacia las cimentaciones de la misma.

Tabla N°1. Modelado de la estructura en el software estructural ETABS

STORY	LOC	LOAD	P (KN)
STORY1	B1	COMB1	307.31
STORY1	B3	COMB1	551.32
STORY1	B6	COMB1	651.84
STORY1	B8	COMB1	638.07
STORY1	B9	COMB1	361.66

Fuente: Software estructural ETABS, 2017

Posteriormente, se realizó el cálculo de las solicitaciones con los métodos planteados en la parte de metodología del presente artículo, en el cual podemos observar los resultados de las solicitaciones calculadas por los tres métodos que generan las cimentaciones.

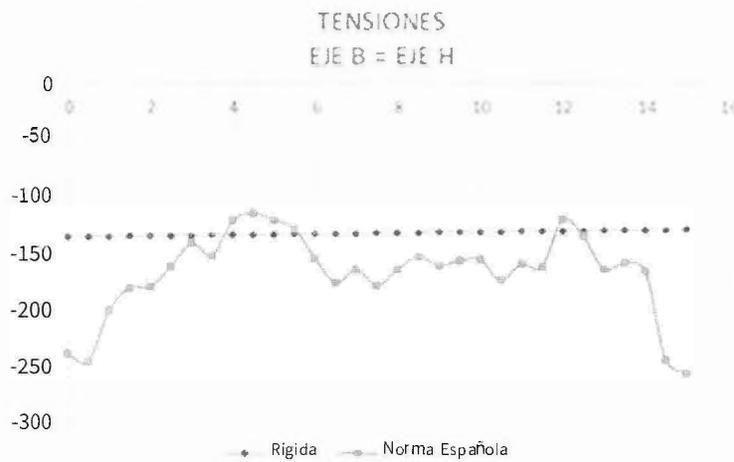
Tabla Nº2. Resultados del cálculo de las solicitaciones del eje B

RESULTADOS DEL CALCULO DE LAS SOLICITACIONES EJE B				
MÉTODO	TENSION	CORTANTE	MOMENTO SUPERIOR	MOMENTO INFERIOR
	[KN/m <sup>2</sup> ]	[KN]	[KN-m]	[KN-m]
Cimentación Rígida	135.38	-498.33	692.50	-
Cimentación Flexible Norma Española	253.96	515.67	295.10	303.85
Cimentación Flexible Hetenyi-Timoshenko	-	522.58	355.20	312.04

Fuente: Elaboración propia, 2017

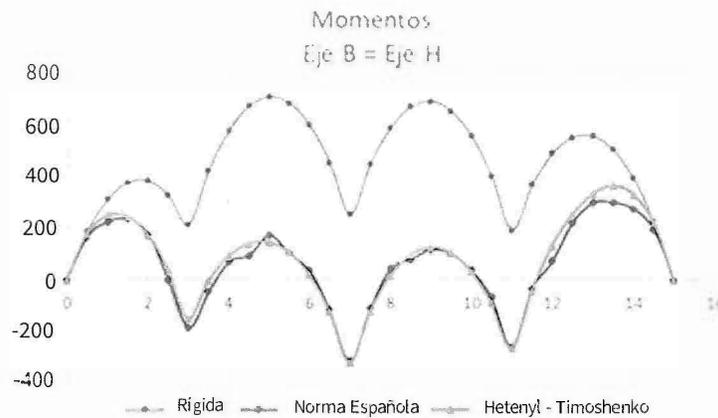
Es así como, luego de observar los resultados de las solicitaciones, podemos mostrar la comparación técnica de los resultados obtenidos mediante graficas ilustradas en Excel para su comparación y análisis técnico de dichas cimentaciones del edificio diseñado.

Figura Nº5. Comparación del diagrama de tensiones calculado para el eje B



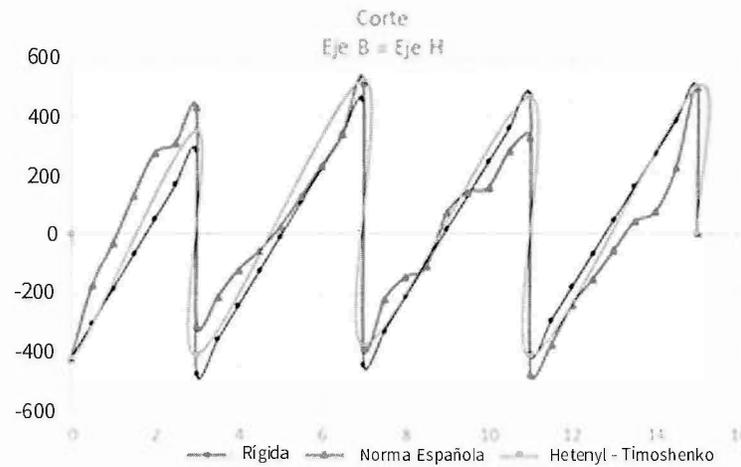
Fuente: Elaboración propia, 2017

Figura Nº6. Comparación del diagrama de momentos calculado para el eje B



Fuente: Elaboración propia, 2017

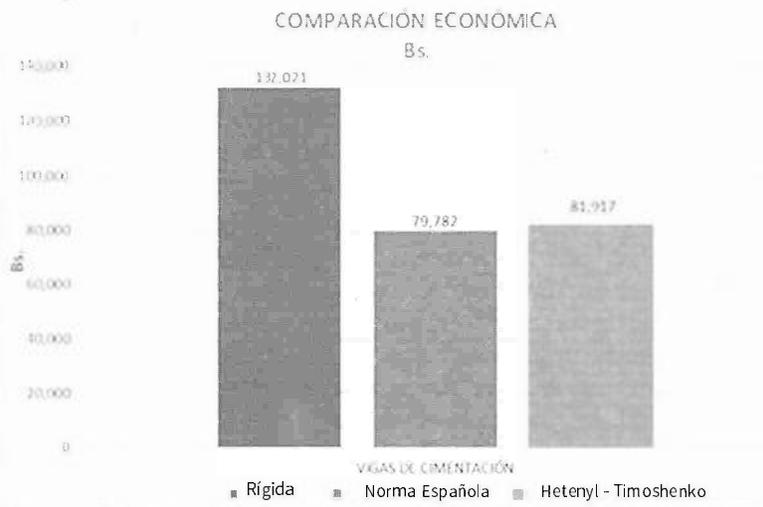
Figura N°7. Comparación del diagrama de corte calculado para el eje B



Fuente: Elaboración propia, 2017

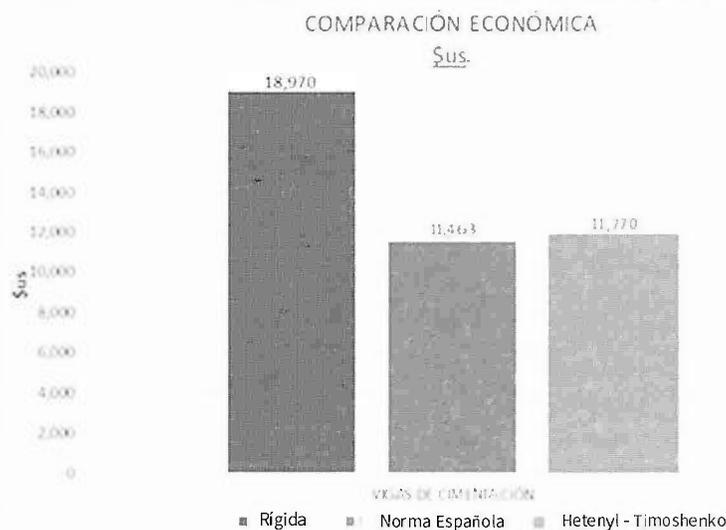
En las siguientes graficas podemos mostrar el análisis económico que nos muestran los resultados de diseño comparando los tres distintos tipos de cimentaciones que se plantearon, llegando a observar que la cimentación más económica y segura de acuerdo con las normas vigentes de edificaciones en hormigón armado es la opción de la viga de cimentación flexible realizada con el método de la Norma Española mediante el uso de ábacos, con un costo total de 79,782 bolivianos, equivalente a 11,463 dólares.

Figura N°8. Comparación económica de las cimentaciones en bolivianos (Bs.)



Fuente: Elaboración propia, 2017

Figura Nº9. Comparación económica de las cimentaciones en Dólares (\$us.)



Fuente: Elaboración propia, 2017

### DISCUSIÓN

En la elaboración de proyectos de edificaciones, la seguridad y la economía son algunos de los factores importantes; por lo tanto, se deberá proyectar estructuras seguras y económicas, considerando especificaciones técnicas, normas vigentes y requisitos de seguridad para el óptimo diseño y ejecución de obras civiles.

En ocasiones, el ingeniero proyectista no realiza un correcto análisis comparativo técnico-económico entre las cimentaciones que se plantea diseñar (en nuestro caso, las vigas de cimentación rígidas y vigas de cimentación flexibles. Este indicado análisis tendrá el objetivo de obtener un óptimo diseño de la estructura de cimentación. Considerando normas vigentes y especificaciones técnicas dentro del área de las cimentaciones, el incorrecto estudio técnico-económico de las cimentaciones mencionadas puede llegar a tener pérdidas económicas considerables.

Dado el uso de vigas de cimentación -ya sean estas rígidas o flexibles, utilizadas en el diseño de edificaciones de hormigón armado- se planteó realizar el análisis técnico y económico entre las ya mencionadas cimentaciones, puesto que el ingeniero proyectista deberá elegir el tipo de cimentación adecuado entre los sistemas de fundaciones indicados para poder realizar un óptimo diseño estructural y así obtener edificaciones seguras y económicas para los usuarios de la estructura.

Para aplicar y diseñar el tipo de fundación ideal en construcciones de hormigón armado -en este caso, las vigas de cimentación rígidas o flexibles- es necesario realizar el análisis ya planteado entre los dos tipos de cimentaciones, ya que el uso de este tipo de fundaciones se hace más frecuente en estructuras de edificaciones de mediana altura.

Cabe mencionar que en este artículo se mostró que la mejor opción para realizar un tipo de fundación para el edificio que se observó son las vigas de cimentación flexibles validadas por la Norma Española, ya que éstas dan como resultado que son óptimas económica y técnicamente para el desarrollo de las mismas.

### RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir investigando el tema de vigas de cimentaciones, pero tomando en cuenta la rigidez del edificio, ya que son usados en otros tipos de estructuras. Asimismo, se recomienda hacer primero las vigas de cimentación rígidas para que el ingeniero calculista tenga una idea del análisis técnico-económico de este tipo de cimentaciones y obtener así resultados óptimos y económicos.

Para futuras investigaciones en el campo de las cimentaciones, se recomienda resolver las ecuaciones diferenciales del método de Hetenyi-Timoshenko para una solución más rápida de las vigas de cimentación flexible.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- (1) Calavera, J. (2003). Cálculo de estructuras de cimentación. (4ª ed.) Madrid, España: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones INTEMAC.
- (2) Camacho, L., Sempertegui, G. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de fundaciones I. Cochabamba, Bolivia: Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencias y Tecnología.
- (3) Gobierno de España, (2011). Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Madrid, España: Ministerio de Fomento, Secretaria General Técnica.

Copyright (c) 2017 Sergio Fernando Machicado Colque; Marcelo Delgadillo Zurita.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

**Atribución:** Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumendelicencia](#) - [Textocompletodelalicencia](#)