

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE PRESIONES ADMISIBLES PROPUESTAS EN  
LAS NORMAS PERUANAS E-060, E-030, E-050 Y NORMAS DE  
CIMENTACIONES CHILENA, MEXICANA Y ESPAÑOLA**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLERA EN  
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORA**

Lozano Guevara, Andrea Mercedes

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLER EN  
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORES:**

Bandach Pantoja, Aaron Salvador

Castillo Sayan, Rodrigo Alberto

De Freitas Vidal, Henry Fernando

Marcas Arrieta, Miguel Manuel

**ASESORA:**

Ortiz Salas, Carmen Eleana

Lima, Diciembre, 2020

## Resumen

Los profesionales responsables de redactar, revisar y publicar cada norma, no suelen ser partícipes en la elaboración de otras normas; ya sea porque se trate de un área o especialidad distinta o porque simplemente se eligieron otros expertos en el ámbito. Lo anterior se puede ver reflejado en diferencias o variaciones de algunos términos y consideraciones en las Normas E.030 “Diseño Sismorresistente”, E.050 “Suelos y Cimentaciones” y E.060 “Concreto Armado”, y su aplicación en la construcción de proyectos. Por ejemplo, para la Norma E.060, se puede incrementar en un 30% la presión admisible del suelo; mientras que la Norma E.050 no hace ningún tipo de referencia a un incremento de dicho parámetro. El término de presión admisible de un suelo es de suma importancia puesto que se ve mencionado en tres normas del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE). Asimismo, es utilizado por diferentes expertos, sean de distintas especialidades o no, pues involucra parte importante del diseño total de una edificación. Por dicho motivo, además de la importancia de conocer las distinciones, surge la necesidad de compatibilizar conceptos referidos a presiones admisibles entre las distintas normas. El objetivo principal de este trabajo de investigación es recopilar términos relacionados a las presiones admisibles para su posterior comparación entre las Normas E.030, E.050 y E.060. Esto se realizará mediante la revisión de las distintas normas anteriormente mencionadas. Asimismo, se revisarán otras normas internacionales como la Norma chilena, Norma mexicana y Norma española con el fin de contrastar la terminología referida a presiones admisibles y, a partir de ello, presentar una propuesta que logre uniformizar conceptos.

## ÍNDICE

Capítulo 1	GENERALIDADES.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Justificación.....	1
1.3	Alcance.....	1
1.4	Objetivos.....	1
1.4.1	Objetivo General.....	1
1.4.2	Objetivos Específicos.....	1
1.5	Metodología.....	2
Capítulo 2	REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	3
2.1	Capacidad de carga última.....	3
2.1.1	Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (Braja Das, 2011).....	3
2.1.2	Norma peruana (E.050, 2018).....	4
2.1.3	Norma chilena (NCh 1508 of 2014).....	4
2.1.4	Norma mexicana (Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de cimentaciones).....	4
2.1.5	Norma española (Documento Básico – Seguridad estructural de cimientos).....	4
2.2	Asentamientos.....	5
2.2.1	Norma peruana.....	6
2.2.2	Norma chilena.....	6
2.2.3	Norma mexicana.....	6
Capítulo 3	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
3.1	Norma E.030.....	8
3.1.1	Presiones actuantes y esfuerzos admisibles (Artículo 44.2).....	8
3.1.2	Capacidad portante (Artículo 45).....	8
3.1.3	Entrevista a miembro del comité de la norma E.030 Gianfranco Ottazzi:..	8
3.2	Norma E.060.....	8
3.2.1	Resistencia admisible (Artículo 15.2.2).....	9

3.2.2	Presiones de contacto (Artículo 15.2.3) .....	9
3.2.3	Presión admisible (Artículo 15.2.4) .....	9
3.2.4	Esfuerzos en el suelo (Artículo 15.2.5) .....	9
3.2.5	Capacidad portante (Artículo 15.2.6) .....	9
3.2.6	Entrevista a miembro del comité de la norma E.060 Gianfranco Ottazzi:..	9
3.3	Norma E.050.....	10
3.3.1	Definiciones (Artículo 5) .....	10
3.3.2	Cargas aplicadas (Artículo 17.1).....	10
3.3.3	Capacidad de carga (Artículo 20).....	11
3.3.4	Factor de seguridad frente a una falla por corte (Artículo 21).....	11
3.3.5	Presión admisible (Artículo 22) .....	12
3.3.6	Cargas excéntricas (Artículo 28).....	12
3.3.7	Cargas inclinadas (Artículo 29).....	12
3.4	Norma de Chile.....	12
3.4.1	Definiciones (NCh179 de 1980) .....	13
3.4.2	Cargas aplicadas (NCh 2369 de 2002).....	13
3.4.3	Capacidad de soporte del suelo .....	14
3.4.4	Factor de seguridad frente a falla por corte.....	16
3.4.5	Presión admisible .....	16
3.4.6	Cargas excéntricas.....	16
3.4.7	Cargas inclinadas.....	18
3.5	Norma de México .....	18
3.5.1	Definiciones .....	18
3.5.2	Cargas aplicadas .....	19
3.5.3	Estado límite de falla.....	20
3.5.4	Capacidad de carga del suelo reducida .....	20
3.6	Norma de España.....	23
3.6.1	Estados límite último y de servicio (Artículo 2.2.1.1) .....	23

3.6.2	Definiciones (Artículo 4.3.1.1) .....	23
3.6.3	Área equivalente de un cimiento (Artículo 4.3.1.3).....	24
3.6.4	Determinación de la presión de hundimiento (Artículo 4.3.2).....	25
Capítulo 4	COMPARACIONES NORMATIVAS Y PRÁCTICAS .....	27
4.1	Comparación entre normas peruanas.....	27
4.1.1	Comparación de términos.....	27
4.1.2	Comparación de la presión admisible .....	28
4.2	Comparación cualitativa entre normas peruana y extranjeras .....	28
4.2.1	Comparación de términos.....	28
4.2.2	Comparación de la Capacidad de carga .....	29
4.3	Comparación cuantitativa entre normas peruana y extranjeras .....	30
4.3.1	Ejemplo aplicativo.....	30
4.3.2	Predicción de las normas y comparación de resultados: .....	33
Capítulo 5	PROPUESTAS.....	36
5.1	Propuestas referentes a normas nacionales.....	36
5.1.1	Cambios propuestos a la norma E.030 .....	36
5.1.2	Cambios propuestos a la norma E.050 .....	36
5.1.3	Cambios propuestos a la norma E.060 .....	37
5.2	Propuesta referente a normas internacionales .....	37
Capítulo 6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	38
Capítulo 7	BIBLIOGRAFÍA.....	39

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Límites máximo para movimientos y deformaciones originados en la cimentación. Fuente: Norma técnica complementaria-Diseño, construcción y cimentaciones.....	7
Tabla 3.1 Factores de capacidad de soporte según diversos autores. Fuente: Sieffert & Bay-Gress, 2000.....	14
Tabla 3.2 Factores de corrección según Meyerhof (1963). Fuente: Villalobos (2000) .....	15
Tabla 3.3 Factores de corrección según Hansen (1970). Fuente: Villalobos (2000) .....	15
Tabla 3.4 Factores de corrección según Vesic (1973). Fuente: Villalobos (2000) .....	16
Tabla 3.5 Coeficientes de seguridad. Fuente: Ministerio de Fomento (2019) .....	26
Tabla 4.1 Cuadro comparativo de terminología en normas peruanas. Fuente: Propia.....	27
Tabla 4.2 Cuadro comparativo de terminología en normas peruana y extranjeras. Fuente: Propia .....	28
Tabla 4.3 Cuadro resumen para la zapata estudiada. Fuente: Propia .....	33
Tabla 4.4 Presiones últimas para las diez zapatas generadas según cada norma variando el valor de B/L. Fuente: Propia .....	33
Tabla 4.5 Cargas admisibles para las diez zapatas generadas según cada norma variando el valor de B/L. Fuente: Propia .....	34

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Factores K para los casos con flexión biaxial. Fuente: AASHTO, 2002	17
Figura 3.2 Zapata equivalente. Fuente: Documento Básico SE-C Seguridad Estructural Cimientos, 2019	24
Figura 4.1 Variación de la capacidad de carga última variando la relación B/L en un terreno cohesivo. Fuente: Propia	34
Figura 4.2 Variación de la carga admisible variando la relación B/L en un terreno cohesivo. Fuente: Propia	35



## **Capítulo 1 GENERALIDADES**

### **1.1 Introducción**

La existencia de incompatibilidades entre las Normas E.030, E.050 y E.060 con respecto a las presiones admisibles; se ha vuelto relevante debido a que involucra y afecta directamente la definición de capacidad portante del suelo. Dicho parámetro es ampliamente mencionado puesto que rige el diseño de las cimentaciones. Por ello, en la medida en que se uniformicen los términos se esclarecerá los parámetros involucrados en el cálculo de la capacidad resistente del suelo.

### **1.2 Justificación**

Para el diseño de las cimentaciones, es fundamental conocer los parámetros del suelo que rigen los cálculos posteriores tales como las dimensiones de las zapatas. Sin embargo, debido a ciertas diferencias de términos relacionados a presiones admisibles, el contenido suele ser confuso para el diseñador o profesionales involucrados. A partir de esto, surge la necesidad de recopilar los conceptos de las distintas normas para unificar conceptos y llegar a un consenso en cuanto a terminología y consideraciones.

### **1.3 Alcance**

Se recopilará información y se compararán las tres normas de diseño E.030, E.050 y E.060 respecto a las consideraciones tomadas para el cálculo de los esfuerzos aplicados en el suelo. Adicionalmente se consultarán normas extranjeras que puedan conducir a un mejor entendimiento de las definiciones, ecuaciones y análisis que envuelve este término; además se desarrollará un ejemplo numérico para comparar resultados. Una vez identificado los problemas, se propondrá una solución que permita unificar conceptos.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo General**

- Comparar las normas E.030, E.050 y E.060 e identificar las incompatibilidades respecto al empleo de términos relacionados con la capacidad admisible y última del suelo

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Analizar las consideraciones de las normas E.030, E.050 y E.060.
- Analizar las consideraciones de las normas peruana, chilena, mexicana y española.
- Comparar el cálculo de la presión admisible de la norma peruana con las normas chilena, mexicana y española.
- Sugerir correcciones en artículos específicos de las normas E.030, E.050 y E.060.

## **1.5 Metodología**

El presente trabajo tiene como objetivo principal identificar las incongruencias relacionadas con las cargas de trabajo entre los códigos E.030, E.050 y E.060 y su repercusión en el dimensionamiento de las cimentaciones. Para la comparación entre las normas se hará énfasis en las acotaciones de los acápites involucrados para el cálculo de la presión admisible tales como factor de seguridad, factor de reducción de la cohesión entre otros.

### **ACT.1 Análisis de las consideraciones de las normas nacionales**

- T.1 Revisión de la norma peruana E.030 y entrevista a un miembro del comité de la norma
- T.2 Revisión de la norma peruana E.060 y entrevista a un miembro del comité de la norma
- T.3 Revisión de la norma peruana E.050 y entrevista a un miembro del comité de la norma

### **ACT.2 Análisis de las consideraciones de normas internacionales**

- T.1 Revisión de la norma chilena
- T.2 Revisión de la norma mexicana
- T.3 Revisión de la norma española

### **ACT.3 Comparación del cálculo de la presión admisible de la norma peruana con las normas chilena, mexicana y española**

- T.1 Aplicación de la norma peruana
- T.2 Aplicación de la norma chilena
- T.3 Aplicación de la norma mexicana
- T.4 Aplicación de la norma española

### **ACT.4 Recomendación de términos estándar para las normas nacionales**



## Capítulo 2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

En el presente capítulo se describirán dos conceptos fundamentales en el diseño de edificaciones: capacidad de carga última y asentamientos. Asimismo, se describirán los términos relacionados a dichos parámetros mencionados en cuatro diferentes normas.

### 2.1 Capacidad de carga última

A partir de la revisión de diferentes fuentes competentes y de las distintas normas a considerar en el presente trabajo de investigación, se recopiló la ecuación general que es empleada en la mayoría de las normas para el cálculo de la capacidad de carga última.

**Ecuación general de la capacidad de carga última de Meyerhof:**

$$q_u = c'N_cF_{cs}F_{cd}F_{ci} + qN_qF_{qs}F_{qd}F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

Donde:

- $c'$ : cohesión
- $q$ : esfuerzo efectivo al nivel de fondo de la cimentación
- $\gamma$ : peso específico del suelo
- $B$ : ancho de la cimentación
- $F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$ : factores de forma
- $F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$ : factores de profundidad
- $F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$ : factores de inclinación de la carga
- $N_c, N_q, N_\gamma$ : factores de capacidad de carga

A continuación, se mostrarán los términos, considerados en cada una de las distintas fuentes, que están relacionados a la capacidad de carga de los suelos. Adicionalmente, se dará una breve descripción de la forma de calcular la capacidad de carga.

#### 2.1.1 Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (Braja Das, 2011)

- a) Capacidad de carga última: La carga por área unitaria de la cimentación a la que ocurre la falla por corte en el suelo
- b) Capacidad de carga permisible: La menor entre la capacidad de carga última reducida por un factor de seguridad aplicado y la obtenida por asentamientos permisibles
- c) Cálculo de capacidad de carga última: Considera todos los factores de corrección considerados por Meyerhof.

### **2.1.2 Norma peruana (E.050, 2018)**

- a) Capacidad de carga: Presión requerida para producir la falla del suelo por corte
- b) Presión admisible: Máxima presión que se puede transmitir al terreno sin que ocurran asentamientos excesivos ni se tenga un factor de seguridad menor que los establecidos
- c) Cálculo de capacidad de carga: Diferencia entre tipo de suelo que recibe la carga. Para suelos cohesivos considera el primer sumando de la ecuación general, para suelos granulares considera los otros dos sumandos y en ambos casos se desprecia el factor de corrección por profundidad.

### **2.1.3 Norma chilena (NCh 1508 of 2014)**

- a) Capacidad de soporte de las fundaciones: La carga por área unitaria de la fundación a la que ocurre la falla por corte en el suelo
- b) Presión admisible de contactos: La menor entre la capacidad de soporte de las fundaciones reducida por un factor de seguridad y la obtenida por asentamientos permisibles
- c) Cálculo de capacidad de carga última: No exige ni recomienda ninguna fórmula o método específico y deja a criterio del profesional competente la elección de estos. Sin embargo, se sabe que en el medio chileno se utiliza la ecuación general completa despreciando el factor de inclinación, mas no el de profundidad. Se utilizan distintas fórmulas para hallar los factores de capacidad de carga y los factores de corrección.

### **2.1.4 Norma mexicana (Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de cimentaciones)**

- a) Capacidad de carga unitaria: La carga por área unitaria de la fundación a la que ocurre la falla por corte en el suelo.
- b) Capacidad de carga unitaria reducida: La menor entre la capacidad de carga unitaria reducida por un factor de resistencia ( $r$ ) y la obtenida por asentamientos permisibles.
- c) Cálculo de capacidad de carga última: Usa una adaptación de la ecuación general de Meyerhof en la que no incluye directamente los factores de corrección y desprecian los factores de corrección por inclinación y profundidad.

### **2.1.5 Norma española (Documento Básico – Seguridad estructural de cimientos)**

- a) Presión vertical de hundimiento: La resistencia caracterizada de terreno definida para el estado límite último de hundimiento.
- b) Presión vertical admisible de servicio: La presión vertical admisible teniendo en cuenta no solo la seguridad frente al hundimiento sino también la tolerancia al asentamiento.

- c) Cálculo de capacidad de carga última: Usa la ecuación general de Meyerhof e incluye un factor adicional que considera la influencia de la proximidad del cimiento a un talud.

Por otro lado, el cálculo de los asentamientos es un factor determinante en el cálculo de las dimensiones de elementos de cimentación, como el caso de zapatas. Por ello, es necesario conocer los distintos tipos de asentamiento y los parámetros involucrados en la determinación de cada uno de ellos.

## 2.2 Asentamientos

A partir de la revisión de diferentes fuentes competentes, en los suelos pueden presentarse tres tipos de asentamientos: asentamiento inmediato o instantáneo, asentamiento por consolidación y asentamiento secundario. El primero suele estar relacionado con suelos granulares mientras que los dos últimos son típicos de suelos cohesivos saturados. Sin embargo, las tres componentes pueden presentarse en todo tipo de suelo. A continuación, se detallarán los tres tipos de asentamiento mencionados anteriormente.

- a) Asentamiento inmediato o instantáneo: “Se origina por la deformación elástica del suelo seco, suelos húmedos y saturados, sin ningún cambio en el contenido de humedad. Los cálculos de los asentamientos elásticos se basan, generalmente, en ecuaciones derivadas de la teoría de elasticidad” (Das, 2014, p. 183).
- b) Asentamiento por consolidación: “Resulta por el cambio de volumen de un suelo cohesivo saturado por la expulsión de agua intersticial. Este tipo de asentamiento depende del tiempo” (Das, 2014, p. 183). Existen tres casos para el cálculo de dicho parámetro.

### A. Arcilla Normalmente consolidada

$$\Delta h = \frac{h}{1+e} C_c \log \frac{\sigma_{vo} + \Delta\sigma_{vo}}{\sigma_{vo}}$$

### B. Arcilla Pre consolidada ( $\sigma'_o + \Delta\sigma < \sigma'_p$ )

$$\Delta h = \frac{h}{1+e} C_R \log \frac{\sigma_{vo} + \Delta\sigma_{vo}}{\sigma_{vo}}$$

### C. Arcilla Pre consolidada ( $\sigma'_o + \Delta\sigma > \sigma'_p$ )

$$\Delta h = \frac{h}{1+e} \left( C_R \log \frac{\sigma_p}{\sigma_{vo}} + C_c \log \frac{\sigma_{vo} + \Delta\sigma'_v}{\sigma_{vp}} \right)$$

- c) Asentamiento secundario: Está asociado al fenómeno de consolidación secundaria del suelo y se da como producto de la deformación en el tiempo, a un esfuerzo efectivo contante.

### **2.2.1 Norma peruana**

- a) Asentamientos (Artículo 18): “Los asentamientos se estiman utilizando las fórmulas aceptadas por la mecánica de suelos a partir de parámetros obtenidos mediante los ensayos in situ o los ensayos de laboratorio” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 37)
- b) Asentamiento tolerable (Artículo 19): Parámetro que debe indicarse en todo Estudio de Mecánica de Suelos (EMS). “El asentamiento diferencial no debe ocasionar una distorsión angular mayor al valor límite. Además, en caso de suelos granulares el asentamiento diferencial se puede estimar como el 75% del asentamiento total.” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 37)
- c) Presión admisible por asentamiento: “Presión que, al ser aplicada por la cimentación adyacente a una estructura, ocasiona un asentamiento diferencial igual al asentamiento admisible. En este caso no es aplicable el concepto de factor de seguridad, ya que se trata de asentamientos.” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 26).

### **2.2.2 Norma chilena**

Esta norma no considera que los cálculos de asentamiento en el tiempo correspondan al estudio de mecánica de suelos ya sea para mediano o largo plazo según lo especifica en el artículo 6.5 “Seguimiento geotécnico” de la NCh 1508 of 2014 Geotecnia- Estudio de mecánica de suelos. Sin embargo, en el artículo 4.4 “Esfuerzos internos autoinducidos” de la Norma NCh 3171 Diseño estructural- Disposiciones generales y combinaciones de carga señala que será necesario considerar los esfuerzos producto de los asentamientos cuando corresponda; es decir, se tendrá que calcular el valor de dicho asentamiento diferencial en las fundaciones.

### **2.2.3 Norma mexicana**

A diferencia de las otras dos normas, la norma mexicana sí tiene más detalles y consideraciones en cuanto a asentamiento. Por ejemplo, para el estado límite de servicio (acciones permanentes más acciones variables) propone asentamientos máximos permitidos y emersiones máximas permitidas tal como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 2.1 Límites máximo para movimientos y deformaciones originados en la cimentación. Fuente: Norma técnica complementaria-Diseño, construcción y cimentaciones.

a) Movimientos verticales (hundimiento o emersión)		
Concepto		Límite
En la zona I:		
Valor medio en el área ocupada por la construcción:		
Asentamiento:	Construcciones aisladas	50 mm <sup>(2)</sup>
	Construcciones colindantes	25 mm
En las zonas II y III:		
Valor medio en el área ocupada por la construcción:		
Asentamiento:	Construcciones aisladas	300 mm <sup>(2)</sup>
	Construcciones colindantes	150 mm
Emersión:	Construcciones aisladas	300 mm <sup>(2)</sup>
	Construcciones colindantes	150 mm
Velocidad del componente diferido		10 mm/semana
b) Inclinación media de la construcción		
Tipo de daño	Limite	Observaciones
Inclinación visible	100 / (100 + 3h <sub>c</sub> ) por ciento	h <sub>c</sub> = altura de la construcción en m
Mal funcionamiento de grúas viajeras	0.3 por ciento	En dirección longitudinal
c) Deformaciones diferenciales en la propia estructura y sus vecinas (véase tabla 6.2 de las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones)		
<sup>1</sup> Comprende la suma de movimientos debidos a todas las combinaciones de carga que se especifican en el Reglamento y las Normas Técnicas Complementarias. Los valores de la tabla son sólo límites máximos y en cada caso habrá que revisar que no se cause ninguno de los daños mencionados al principio de este Capítulo.		
<sup>2</sup> En construcciones aisladas será aceptable un valor mayor si se toma en cuenta explícitamente en el diseño estructural de los pilotes y de sus conexiones con la subestructura.		

En cuanto a asentamientos instantáneos bajo solicitaciones de servicio como cargas permanentes y cargas variables, podrán calcularse con la teoría de la elasticidad. Se tiene la siguiente expresión:

$$\Delta H = \sum_0^H \left[ \frac{\Delta e}{1 + e_0} \right] \Delta Z$$

Donde:

- $\Delta H$  es el asentamiento de un estrato de espesor H.
- $e_0$  es la relación de vacíos inicial.
- $\Delta e$  es la variación de la relación de vacíos bajo el incremento de esfuerzo efectivo vertical  $\Delta p$  inducido a la profundidad z por la carga superficial.
- $\Delta Z$  son los espesores de los estratos elementales dentro de los cuales los esfuerzos pueden considerarse uniformes.



### **Capítulo 3 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

A continuación, se definirán los conceptos claves relacionados al término de presión admisible de acuerdo a las normas peruana, chilena, mexicana y española.

#### **3.1 Norma E.030**

De la norma peruana E.030, se recopilaron los siguientes conceptos:

##### **3.1.1 Presiones actuantes y esfuerzos admisibles (Artículo 44.2)**

“La determinación de las **presiones actuantes** en el suelo para la verificación por **esfuerzos admisibles**, se hace con las fuerzas obtenidas del análisis sísmico multiplicadas por 0,8.” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 35)

##### **3.1.2 Capacidad portante (Artículo 45)**

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018) considera lo siguiente:

“En todo estudio de mecánica de suelos se consideran los efectos de los sismos para la determinación de la **capacidad portante** del suelo de cimentación. En los sitios en que pueda producirse licuación del suelo, se efectúa una investigación geotécnica que evalúe esta posibilidad y determine la solución más adecuada. (p. 35)”.

##### **3.1.3 Entrevista a miembro del comité de la norma E.030 Gianfranco Ottazzi:**

¿Por qué se reduce al 80% la sollicitación por carga sísmica para la verificación de esfuerzos en el suelo?

- En la norma de sismo, las fuerzas laterales que tiene son a nivel de resistencia (carga última), entonces cuando tú verificas las presiones en el suelo, si estás trabajando con esfuerzos admisibles, esas cargas que están en estado último las tienes que pasar a cargas de servicio y de eso viene el famoso 1.25.
- La norma de E.060 del 77 el sismo estaba en servicio en las combinaciones se usaba  $1.25 (D+L) +/- 1.25S$  pero era absurdo que se trabaje el sismo a nivel de servicio cuando no existe una definición de sismo en servicio, entonces se la pasó al estado último multiplicando el efecto por 1.25. Entonces para regresar del estado último al estado de servicio se multiplicó por la inversa 0.80.

#### **3.2 Norma E.060**

En la norma peruana E.060 se mencionan los siguientes términos:



### **3.2.1 Resistencia admisible (Artículo 15.2.2)**

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2009) considera lo siguiente:

“El área de la base de la zapata o el número y distribución de pilotes debe determinarse a partir de las fuerzas y momentos no amplificados (en servicio) transmitidos al suelo o a los pilotes a través de la zapata. El área de la zapata debe determinarse a partir de la **resistencia admisible** del suelo o de la capacidad admisible de los pilotes, establecida en el estudio de mecánica de suelos. (p. 126)”.

### **3.2.2 Presiones de contacto (Artículo 15.2.3)**

“En el cálculo de las **presiones de contacto** entre las zapatas y el suelo no se deberán considerar las tracciones.” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2009, p. 126)

### **3.2.3 Presión admisible (Artículo 15.2.4)**

“Se podrá considerar un incremento del 30% en el valor de la **presión admisible** del suelo para los estados de cargas en los que intervengan cargas temporales, tales como sismo o viento.” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2009, p. 126)

### **3.2.4 Esfuerzos en el suelo (Artículo 15.2.5)**

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2009) considera lo siguiente.

“Para determinar los **esfuerzos en el suelo** o las fuerzas en pilotes, las acciones sísmicas podrán reducirse al 80% de los valores provenientes del análisis, ya que las solicitaciones sísmicas especificadas en la NTE E.030 Diseño Sismorresistente están especificadas al nivel de resistencia de la estructura. (p. 126)”.

### **3.2.5 Capacidad portante (Artículo 15.2.6)**

“En terrenos de baja **capacidad portante** ó cimentaciones sobre pilotes, deberá analizarse la necesidad de conectar las zapatas mediante vigas, evaluándose en el diseño el comportamiento de éstas de acuerdo a su rigidez y la del conjunto suelo-cimentación.” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2009, p. 126)

### **3.2.6 Entrevista a miembro del comité de la norma E.060 Gianfranco Ottazzi:**

¿Por qué se menciona el incremento del 30% al valor de la presión admisible del suelo para la verificación de esfuerzos admisibles para cargas sísmicas?

- Porque son cargas temporales de corta duración, las cuales históricamente han sido empleadas para el método de diseño por esfuerzos admisibles. Cuando se diseñaban estructuras con esa metodología para cargas e cortas duración como las mencionadas permitían un incremento en los esfuerzos del 30%. Además, la presión que entrega el EMS es una presión admisible bajo cargas de servicio, no bajo cargas últimas; en esas condiciones, se permite un incremento de 30% por la corta duración que tienen dichas

cargas.

- La norma de suelos lo trata de manera distinta, en vez de permitir un 30%, permite reducir el factor de seguridad que a la larga es más o menos lo mismo.

¿Ese valor ha sido siempre el mismo?

- El valor siempre ha sido el mismo y viene de muchos atrás.

### **3.3 Norma E.050**

De la norma peruana E.050, se recopilaron los siguientes términos y definiciones:

#### **3.3.1 Definiciones (Artículo 5)**

- **Capacidad de carga:** Presión requerida para producir la falla del suelo por corte que sirve de apoyo a la cimentación (Sin factor de seguridad).
- **Carga admisible:** Sinónimo de Presión admisible.
- **Carga de servicio:** Carga viva más carga muerta más cargas inducidas por los sismos (sin factores de ampliación).
- **Carga de trabajo:** Sinónimo de Presión admisible.
- **Presión admisible:** Máxima presión que la cimentación puede transmitir al terreno sin que ocurran asentamientos excesivos (mayores que el admisible) ni el factor de seguridad frente a una falla por corte sea menor que el valor indicado en el artículo 21.
- **Presión admisible por asentamiento:** Presión que, al ser aplicada por la cimentación adyacente a una estructura, ocasiona un asentamiento diferencial igual al asentamiento admisible. En este caso no es aplicable el concepto de factor de seguridad, ya que se trata de asentamientos.
- **Presión aplicada o Presión de contacto ( $q_{ap}$ ):** Carga transmitida por las estructuras al terreno en el nivel de cimentación. Valor de la presión uniforme aplicada por el área efectiva de la zapata (definida como  $B' \times L'$ ) sobre el suelo en el plano de apoyo de la cimentación.
- **Presión de trabajo:** Sinónimo de presión admisible. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 24).

#### **3.3.2 Cargas aplicadas (Artículo 17.1)**

“Para el cálculo del factor de seguridad de cimentaciones: Se utilizan como **cargas aplicadas** a la cimentación, las Cargas de Servicio que se utilizan para el diseño estructural de las columnas del nivel más bajo de la edificación.” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 37).

### 3.3.3 Capacidad de carga (Artículo 20)

- **Artículo 20.1:** La capacidad de carga ( $q_d$ ) es la presión última o de falla por corte del suelo y se determina utilizando las fórmulas aceptadas por la mecánica de suelos a partir de parámetros determinados mediante los ensayos in situ indicados en la Tabla 3 o los ensayos de laboratorio.
- **Artículo 20.2:** En suelos cohesivos (arcilla, arcilla limosa y limo-arcilloso) se emplea el ángulo de fricción ( $\phi$ ) igual a cero.

$$q_d = s_c * i_c * c * N_c$$

- **Artículo 20.3:** En fricciones (gravas, arenas y gravas-arenosas), se emplea una cohesión ( $c$ ) igual a cero.

$$q_d = i_q * \gamma_1 * D_f * N_q + 0.5 * S_\gamma * i_\gamma * \gamma_2 * B * N_\gamma$$

- **Artículo 20.4:** Para las ecuaciones de los artículos 20.2 y 20.3 se tiene:

$$N_q = \varepsilon^{(\pi \tan \phi')} \tan^2 \left[ \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) \right]$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi'$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1,4 \phi')$$

$$S_c = 1 + 0,2 \frac{B}{L}$$

$$i_c = i_q = \left( 1 - \frac{\alpha^\circ}{90^\circ} \right)^2$$

$$S_\gamma = 1 - 0,2 \frac{B}{L}$$

$$i_\gamma = \left( 1 - \frac{\alpha^\circ}{\phi^\circ} \right)^2$$

(Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 38)

### 3.3.4 Factor de seguridad frente a una falla por corte (Artículo 21)

Los factores de seguridad mínimos que deben tener las cimentaciones son los siguientes:

- **Artículo 21.1:** Para cargas estáticas: 3.0
- **Artículo 21.2:** Para sollicitación máxima de sismo o viento (la que sea más desfavorable): 2.5

### 3.3.5 Presión admisible (Artículo 22)

La presión admisible es la menor de la que se obtenga mediante:

- **Artículo 22.2.1:** “La aplicación de las ecuaciones de capacidad de carga por corte afectada por el factor de seguridad correspondiente (Ver artículo 20).” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 37).
- **Artículo 22.2.2:** “La presión que cause el asentamiento admisible.” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 37).

### 3.3.6 Cargas excéntricas (Artículo 28)

- **Artículo 28.1:** En el caso de cimentaciones superficiales que transmiten al terreno una carga vertical  $Q$  y dos momentos  $M_x$  y  $M_y$  que actúan simultáneamente según los ejes  $x$  e  $y$ , respectivamente, el sistema formado por estas tres sollicitaciones es estáticamente equivalente a una carga vertical excéntrica ubicada en el punto  $(e_x, e_y)$  siendo:

$$e_x = \frac{M_x}{Q} \quad e_y = \frac{M_y}{Q}$$

- **Artículo 28.2:** El ancho  $B$  o largo  $L$ , se corrige por excentricidad reduciéndolo en dos veces la excentricidad para ubicar la carga en el centro de gravedad del área efectiva= $B' * L'$

$$B' = B - 2 * e_x \quad L' = L - 2 * e_y$$

- **Artículo 28.3:** El centro de gravedad del área efectiva coincide con la posición y sigue el contorno más próximo de la base real con la mayor precisión posible. Su forma es rectangular, aún en el caso de cimentaciones circulares. Las cimentaciones no rectangulares se dimensionan de acuerdo a lo indicado en el numeral 23.3. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 42)

### 3.3.7 Cargas inclinadas (Artículo 29)

“La carga inclinada modifica la configuración de la superficie de falla, por lo que la ecuación de capacidad de carga es calculada tomando en cuenta su efecto.” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 42)

## 3.4 Norma de Chile

De la norma chilena, se recopilaron los siguientes términos y definiciones:

### 3.4.1 Definiciones (NCh179 de 1980)

- **Carga (axial) aplicada:** Fuerza total que actúa en una superficie exterior determinada de un cuerpo o de una masa de suelo.
- **Presión (axial) aplicada:** Fuerza por unidad de área que actúa en una superficie exterior determinada de un cuerpo o de una masa de suelo.
- **Presión límite:** La norma introduce el término en cuestión; sin embargo, no lo define.
- **Factores de capacidad de soporte:** Factores adimensionales ( $N_c$ ,  $N_q$  y  $N_\gamma$ ) que intervienen en las expresiones de capacidad de soporte de  $c$  y  $\phi$ .
- **Capacidad de soporte:** Dicho término no se encuentra definido explícitamente entre los conceptos manejados por la norma. Sin embargo, en función a la definición anterior, se puede interpretar dicho término como la capacidad de carga última del suelo.
- **Tensión (o presión) de contacto admisible:** Término no definido en la norma, pero que se usa recurrentemente en otras normas y en la práctica tradicional chilena para referirse a la capacidad de soporte afectada por el factor de seguridad utilizado (Paillao, 2016).

### 3.4.2 Cargas aplicadas (NCh 2369 de 2002)

En el Anexo C de la norma, se menciona que las tensiones en el suelo, las deformaciones y la estabilidad de la fundación deben ser verificadas para todas las combinaciones del método de tensiones admisibles que se define en la norma NCh 3171. A continuación, se muestran las combinaciones de carga para el análisis de tensiones admisibles.

- 1) D
- 2) D + L
- 3) D + ( $L_r$  o S o R)
- 4) D + 0.75\*L + 0.75\* ( $L_r$  o S o R)
- 5a) D + W
- 5b) D + E
- 6a) D + 0.75\*W + 0.75\*L + 0.75\*( $L_r$  o S o R)
- 7) 0.6\*D + W
- 8) 0.6\*D + E

Donde:

- D: Carga permanente
- L: Carga de uso según NCh1537



- Lr: Carga de uso de techo según NCh1537
- E: Carga sísmica según NCh433 y NCh2369
- S: Carga de nieve según NCh431
- R: Carga de lluvia según ASCE/SEI 07, capítulo 8
- W: Carga de viento según NCh432

Según las combinaciones vistas, el caso más similar a nuestra Norma sería el 6b, en el cual se asume un 75% de la carga de sismo y un 75% de la carga de uso que sería un equivalente a la carga viva.

### 3.4.3 Capacidad de soporte del suelo

Las normas chilenas no definen explícitamente como se realiza el cálculo de la capacidad de soporte del suelo. Las formulaciones y consideraciones presentadas se basan en la investigación de Daniel Paillao la cual menciona que en el medio chileno se utilizan, en su mayoría, tres formulaciones de distintos autores (Meyerhof, Versic y Hansen). Está a libre disposición del proyectista elegir que formulación utilizar. A continuación, se muestra la fórmula utilizada.

$$q_{ult} = s_c d_c c N_c + s_q d_q \gamma D_f N_q + s_\gamma d_\gamma \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$$

Como se puede ver la ecuación usada para la capacidad de carga en cimentaciones superficiales no incluye factores de corrección por inclinación; sin embargo, incluye factores de corrección por forma ( $s_c$ ,  $s_q$ ,  $s_\gamma$ ) y profundidad ( $d_c$ ,  $d_q$ ,  $d_\gamma$ ) la cual es una diferencia importante respecto a nuestra norma.

Como se mencionó anteriormente, está a libre disposición del proyectista la formulación que se utilizará para determinar la capacidad de carga. A continuación, se muestran las más usuales en el medio chileno.

Tabla 3.1 Factores de capacidad de soporte según diversos autores. Fuente: Sieffert & Bay-Gress, 2000

Meyerhof (1963)	$(N_q - 1) \tan(1,4\phi)$	$(N_q - 1) \cot \phi$	$\tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \exp(\pi \tan \phi)$
Hansen (1970)	$1.5(N_q - 1) \tan \phi$	$(N_q - 1) \cot \phi$	$\tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \exp(\pi \tan \phi)$
Vesic (1973)	$2(N_q + 1) \tan \phi$	$(N_q - 1) \cot \phi$	$\tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \exp(\pi \tan \phi)$



Tabla 3.2 Factores de corrección según Meyerhof (1963). Fuente: Villalobos (2000)

Factores	Valor	para
Forma	$s_c = 1 + 0.2K_p \frac{B}{L}$	Cualquier $\phi$
	$s_q = s_\gamma = 1 + 0.1K_p \frac{B}{L}$	$\phi > 10^\circ$
Profundidad	$s_q = s_\gamma = 1$	$\phi = 0$
	$d_c = 1 + 0.2\sqrt{K_p} \frac{D_f}{L}$	Cualquier $\phi$
	$d_q = d_\gamma = 1 + 0.1\sqrt{K_p} \frac{D_f}{L}$	$\phi > 10^\circ$
	$d_q = d_\gamma = 1$	$\phi = 0$

Donde  $K_p = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$ ; (B,L) = ancho y largo de la zapata.

Tabla 3.3 Factores de corrección según Hansen (1970). Fuente: Villalobos (2000)

Factores de forma	Factores de profundidad
$s'_c = 0.2 \frac{B'}{L'} \quad \phi = 0^\circ$	$d'_c = 0.4k \quad \phi = 0^\circ$
$s_c = 1.0 + \frac{N_q}{N_c} \cdot \frac{B'}{L'}$	$d_c = 1.0 + 0.4k$
$s_c = 1.0$ Para fundaciones corridas	$k = \frac{D_f}{B} \quad \frac{D_f}{B} \leq 1$
$s_q = 1.0 + \frac{B'}{L'} \text{sen} \phi$ Para todo $\phi$	$k = \arctan\left(\frac{D_f}{B}\right) \quad \frac{D_f}{B} > 1$
$s_\gamma = 1.0 - 0.4 \frac{B'}{L'} \geq 0.6$	$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \text{sen} \phi)^2 k$
	$d_\lambda = 1.0$ para todo $\phi$

B' y L' denotan dimensiones basales "efectivas" (corregidas por excentricidad de cargas)

Tabla 3.4 Factores de corrección según Vesic (1973). Fuente: Villalobos (2000)

Factores de forma	Factores de profundidad
$s_c = 1.0 + \frac{N_q \cdot B}{N_c \cdot L}$	$d_c = 1.0 + 0.4k$
$s_c = 1.0$ Para fundaciones corridas	$k = \frac{D_f}{B}$ para $\frac{D_f}{B} \leq 1$
$s_q = 1.0 + \frac{B}{L} \tan \phi$ para todo $\phi$	$k = \arctan\left(\frac{D_f}{B}\right)$ para $\frac{D_f}{B} > 1$
$s_\gamma = 1.0 - 0.4 \frac{B}{L} \geq 0.6$	$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 k$
	$d_\gamma = 1.0$ para todo $\phi$

### 3.4.4 Factor de seguridad frente a falla por corte

De igual forma, no se menciona explícitamente los factores de seguridad a utilizar. Sin embargo, el valor utilizado comúnmente es de 3 para los casos estáticos de carga y para los casos con carga sísmica se suele incrementar el valor de la presión admisible obtenida en valores entre el 30 y 50%; la práctica usual es usar 33%. Esto equivale a una reducción del factor de seguridad.

### 3.4.5 Presión admisible

El término no se encuentra definido explícitamente, por lo que se puede asumir que la presión admisible del suelo será la capacidad de carga afectada por el factor de seguridad por corte. Sin embargo, la NCh433 establece que para que las fundaciones tengan un comportamiento satisfactorio se debe verificar que las presiones de contacto entre el suelo y la fundación sea tal que las deformaciones inducidas sean aceptables para la estructura.

Por lo tanto, la presión admisible queda definida como la menor entre la obtenida por falla por corte y la obtenida por asentamientos. No obstante, la norma chilena no establece como verificar dichos asentamientos ni tampoco que límites son los adecuados para verificar asentamientos diferenciales.

### 3.4.6 Cargas excéntricas

Una carga excéntrica es aquella cuya resultante se encuentra fuera del centro geométrico de la cimentación (Paillao, 2016). En Chile, se utilizan dos casos para la determinación de las presiones actuantes cuando se presentan cargas excéntricas.

- Si  $e \leq B/6$  toda la base de la fundación está en compresión y la distribución de presiones será rectangular. La presión máxima y mínima se calculará de la siguiente forma.

$$q_{\max/\min} = \frac{Q}{A} \left( 1 \pm \frac{6e}{B} \right)$$

- Si  $e > B/6$ , parte o la totalidad de la fundación puede dejar de estar en contacto con el suelo y la distribución de presiones pasa a ser una triangular (a diferencia de la rectangular de la Norma E.050).

Fundaciones corridas  $q_{\max} = \frac{2Q}{3\left(\frac{B}{2} - e\right)}$

Fundaciones rectangulares  $q_{\max} = \frac{2Q}{3L\left(\frac{B}{2} - e\right)}$

Para los casos donde se presente flexión biaxial, la fórmula a utilizar será la siguiente.

$$q_{\max} = K \frac{Q}{BL}$$

Donde el factor K se hallará mediante una gráfica provista por la AASHTO a la cual se ingresa con las excentricidades respectivas en cada sentido.

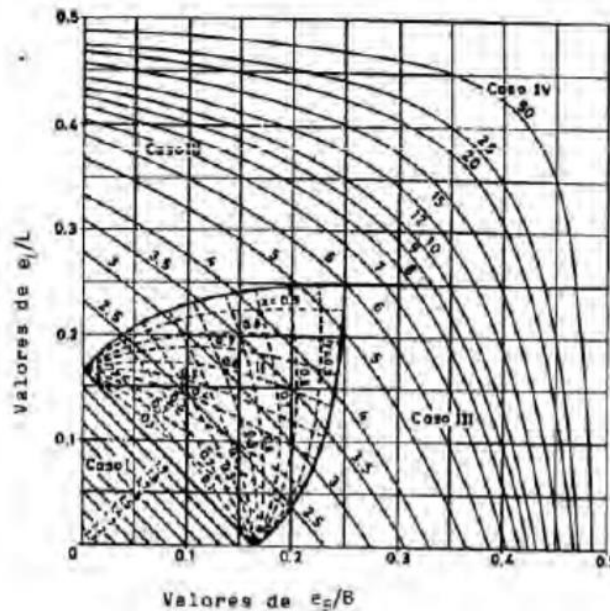


Figura 3.1 Factores K para los casos con flexión biaxial. Fuente: AASHTO, 2002

Una práctica menos usual para simplificar el cálculo de las presiones de contacto es trabajar con las dimensiones efectivas de la zapata, reduciendo su dimensión original en 2 veces la

excentricidad (similar a la norma peruana). Sin embargo, esta forma de trabajo da resultados conservadores.

Las diferencias con la norma peruana son claras sobre todo respecto al análisis biaxial, el cual no se realiza en nuestro medio donde la práctica usual es optar por el caso crítico de los análisis en ambos sentidos.

### **3.4.7 Cargas inclinadas**

Se desprecia el efecto de los factores de corrección por inclinación para cimentaciones superficiales con carga vertical. Sin embargo, se considera cuando se trabaja con muros de contención, donde la carga que llega a la cimentación es inclinada (muros de gravedad o muros de T invertida con terreno en desnivel). En estos casos, se usa como referencia el Canadian Foundation Manual según menciona el ingeniero Ricardo Moffat (2012).

## **3.5 Norma de México**

De la revisión de la norma de México, se recopilaron los siguientes términos y definiciones:

### **3.5.1 Definiciones**

- **Presión vertical:** Es la resultante de la aplicación de una fuerza o presión sobre una masa de suelo.
- **Capacidad de carga:** Es la resistencia a la falla del suelo frente a cargas aplicadas.
- **Capacidad de carga neta:** Presión requerida para producir la falla del suelo por corte que sirve de apoyo a la cimentación (Sin factor de carga ni de resistencia)
- **Factor de carga:** Factores que deben aplicarse a las distintas solicitaciones para el diseño de cimentaciones. Para estados límites de servicio, el factor de carga será unitario.
- **Factor de resistencia:** Son relativos a la capacidad de carga de cimentaciones y determinados con estimaciones analíticas o de pruebas de campo. Para estados límite de falla será 0.35 para la capacidad de carga ante cualquier combinación de acciones en la base de zapatas en la zona I, zapatas de colindancia desplantadas a menos de 5 m de profundidad en las zonas II y III y de los pilotes y pilas apoyados en un estrato friccionante; y 0.65 para los otros casos.
- **Coefficientes de capacidad de carga:** Factores adimensionales ( $N_c$ ,  $N_q$  y  $N_\gamma$ ) que intervienen en las expresiones de capacidad de carga de  $c$  y  $\phi$ .
- **Estado límite de falla:** Se refieren a modos de comportamiento que ponen en peligro la estabilidad de la construcción o de una parte de ella, o su capacidad para resistir nuevas aplicaciones de carga.

### **3.5.2 Cargas aplicadas**

La seguridad de una estructura deberá verificarse para el efecto combinado de todas las acciones que tengan una probabilidad no despreciable de ocurrir simultáneamente, considerándose dos categorías de combinaciones:

- a) Para las combinaciones que incluyan acciones permanentes y acciones variables, se considerarán todas las acciones permanentes que actúen sobre la estructura y las distintas acciones variables, de las cuales la más desfavorable se tomará con su intensidad límite y el resto con su intensidad momentánea, o bien todas ellas con su intensidad media cuando se trate de evaluar efectos a largo plazo. Para la combinación de carga muerta más carga viva, se empleará la intensidad máxima de la carga viva de la sección 6.1, considerándola uniformemente repartida sobre toda el área. Cuando se tomen en cuenta distribuciones de la carga viva más desfavorables que la uniformemente repartida, deberán tomarse los valores de la intensidad instantánea especificada en la mencionada sección.

Para la aplicación de las cargas vivas unitarias se deberá tomar en consideración las siguientes disposiciones:

- La carga viva máxima  $W_m$  se deberá emplear para diseño estructural por fuerzas gravitacionales y para calcular asentamientos inmediatos en suelos, así como para el diseño estructural de los cimientos ante cargas gravitacionales
  - La carga instantánea  $W_a$  se deberá usar para diseño sísmico y por viento y cuando se revisen distribuciones de carga más desfavorables que la uniformemente repartida sobre toda el área
  - La carga media  $W$  se deberá emplear en el cálculo de asentamientos diferidos y para el cálculo de flechas diferidas
  - Cuando el efecto de la carga viva sea favorable para la estabilidad de la estructura, como en el caso de problemas de flotación, volteo y de succión por viento, su intensidad se considerará nula sobre toda el área, a menos que pueda justificarse otro valor.
- b) Para las combinaciones que incluyan acciones permanentes, variables y accidentales, se considerarán todas las acciones permanentes, las acciones variables con sus valores instantáneos y únicamente una acción accidental en cada combinación.

En ambos tipos de combinación los efectos de todas las acciones deberán multiplicarse por los factores de carga apropiados de acuerdo a la norma de diseño. Los criterios de diseño para



cargas de viento y sismo, así como para el de cimentaciones, se presentan en las normas técnicas correspondientes.

### **3.5.3 Estado límite de falla**

Para cimentaciones superficiales, se tendrá que cumplir la siguiente expresión para todas las combinaciones de carga que exige la norma y que fueron mencionadas previamente:

$$\frac{\sum Q * F_c}{A} < r$$

Donde:

- $\sum Q * F_c$ : es la suma de las acciones verticales a tomar en cuenta en la combinación considerada en el nivel de desplante, afectadas por su respectivo factor de carga
- A: Es el área del elemento de cimentación
- r: Es la capacidad de carga unitaria reducida (es decir afectada por el factor de resistencia correspondiente) de la cimentación.

### **3.5.4 Capacidad de carga del suelo reducida**

Como ya se explicó anteriormente la capacidad de carga del suelo reducida es la capacidad de carga del suelo afectado por un factor de resistencia que vendría a ser como el factor de seguridad de la norma peruana. Esta capacidad se obtendrá mediante métodos analíticos, empíricos o numéricos. La norma mexicana indica que se tendrá que evaluar al menos 2 métodos; a continuación, se muestran algunos de los métodos.

#### a) Métodos analíticos

Se aplica solamente a suelos sensiblemente uniformes. En este caso, tomando en cuenta la existencia, especialmente en las zonas I y II, de materiales cementados frágiles que pueden perder su cohesión antes de que se alcance la deformación requerida para que se movilice su resistencia por fricción, se considerará en forma conservadora que los suelos son de tipo puramente cohesivo o puramente friccionante, dependiendo del nivel de deformación esperado. Se tendrá:

Para cimentaciones desplantadas en suelos cohesivos:

$$r = [C_u * N_c] * F_R + p_v$$

Para cimentaciones desplantadas en suelos friccionantes (granulares):

$$r = \left[ \bar{p}_v * (N_q - 1) + \frac{\gamma * B * N_\gamma}{2} \right] * F_R + p_v$$

Donde:

- $\gamma$ : es el peso volumétrico del suelo;
- $C_u$ : es la cohesión aparente determinada en ensaye triaxial no-consolidado no-



drenado, (UU);

- B: es el ancho de la cimentación;
- $p_v$ : es la presión vertical total a la profundidad de desplante por peso propio del suelo;
- $\bar{p}_v$ : es la presión vertical efectiva a la misma profundidad
- $N_c$ : es el coeficiente de capacidad de carga dado por:

$$N_c = 5.14 * (1 + 0.25 * \frac{D_f}{B} + 0.25 * \frac{B}{L})$$

La expresión anterior es válida para  $D_f / B < 2$  y  $B/L < 1$ ; donde  $D_f$  es la profundidad de desplante y  $L$  la longitud del cimiento. Y en caso que  $D_f / B$  y  $B/L$  no cumplan con lo anterior, los valores respectivos serán de 2 y 1.

- $N_q$ : es el coeficiente de capacidad de carga dado por:

$$N_q = e^{\pi * \tan \phi} * \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

Donde  $\phi$  es el ángulo de rozamiento interna del suelo.  $N_q$  se multiplicará por:  $1+(B/L) \tan \phi$  para zapatas rectangulares y por  $1+\tan \phi$  para zapatas circulares o cuadrados.

- $N_\gamma$ : es el coeficiente de capacidad de carga dado por:

$$N_\gamma = 2 * (N_q + 1) * \tan \phi$$

$N_\gamma$  se multiplicará por  $1-0.4(B/L)$  para zapatas rectangulares y por  $0.6$  para zapatas circulares o cuadrados. Estos términos extras que se multiplican a los coeficientes se pueden comparar o asemejar con los factores de corrección propuestos por Meyerhoff.

- FR: es el factor de resistencia

Al emplear las relaciones anteriores se tomará en cuenta lo siguiente:

- a) El parámetro  $\phi$  estará dado por:

$$\phi = \text{Ang } \tan(\lambda * \tan \phi^*)$$

Donde  $\phi^*$  es el ángulo de fricción interna del suelo. El parámetro  $\lambda$  depende del tipo de suelo; para suelos arenosos con compacidad relativa  $D_r$  menor de 67 por ciento, el coeficiente  $\lambda$  será igual a  $0.67+D_r-0.75D_r^2$ . Para suelos con compacidad mayor que el límite indicado,  $\lambda$  será igual a 1.

- b) Si la profundidad del nivel freático es menor al ancho “B” de la zapata el peso volumétrico en la ecuación de capacidad de carga del suelo será:

$$\gamma = \gamma' + \left(\frac{Z}{B}\right) (\gamma_m - \gamma)$$

Donde:

$\gamma$  : es el peso volumétrico sumergido del suelo entre las profundidades  $Z$  y  $(B/2)\tan(45+ \Phi/2)$

$\gamma$ : es el peso volumétrico total del suelo arriba del nivel freático.

- c) Para cargas excéntricas donde la excentricidad está ubicada a una distancia “e” del centro de gravedad de la zapata, el ancho efectivo será:

$$B' = B - 2e$$

El área efectiva quedará reducida si es necesario en sentido longitudinal y transversal si se encuentran excentricidades en X e Y. Además para tomar en cuenta la fuerza cortante se multiplica a los coeficientes  $N_q$  y  $N_c$  por  $(1 - \tan \gamma)^2$  donde  $\gamma$  es la inclinación de la resultante respecto a la horizontal. Estas consideraciones se asemejan a las correcciones por inclinación presentadas en la formulación de Meyerhoff.

- b) Métodos basados en pruebas de campo

Para evaluar la capacidad de carga unitaria se pueden recurrir a pruebas que tengan convicción y certeza comprobada en sus resultados. Estos ensayos pueden usarse para determinar los parámetros de necesarios presentados en el método analítico.

- c) Métodos de análisis límite

Para el caso que se requieran construir cimentaciones en suelos de mal comportamiento como lo son los heterogéneos o agrietados se y no sea factible usar el mecanismo de falla por corte, se podrá recurrir a un estudio de método de análisis límite contemplando fallas locales y globales según sea necesario.

- d) Métodos de modelación numérica

Para circunstancias en las cuales la geometría propia del terreno o estratigrafía sean dificultosas se podrá emplear a configuraciones numéricas (método de elementos finitos).

- e) Métodos basados en la experiencia local

Estos métodos tratan que, de acuerdo a la experiencia local se pueden extraer un rango de valores en los que debería estar los resultados obtenidos de las pruebas de campo y laboratorio que servirán para la comparación y si en caso difieran mucho, se tendrá que revisar y corroborar los resultados.

Además de los métodos mencionados, la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Cimientos indica otros cuantos que podrán también usarse para la determinación de la capacidad de carga del suelo.

#### **Consideraciones adicionales:**

No se permite la cimentación sobre suelos de mala calidad como son los limos no plásticos o

suelos granulares sueltos o saturados que son propensos a perder toda su resistencia cuando se tengan solicitaciones sísmicas. Adicionalmente se debe tener en cuenta circunstancias de vibración donde para una condición severa el factor de resistencia será la mitad de los indicados anteriormente.

### **3.6 Norma de España**

De la revisión de la norma española, se recopilaron los siguientes términos y definiciones:

#### **3.6.1 Estados límite último y de servicio (Artículo 2.2.1.1)**

Para el dimensionado de la cimentación se distinguirá entre:

- a) Estados límite últimos: Asociados con el colapso total o parcial del terreno o con el fallo estructural de la cimentación.
- b) Estados límite de servicio: Asociados con determinados requisitos impuestos a las deformaciones del terreno por razones estéticas y de servicio.

#### **3.6.2 Definiciones (Artículo 4.3.1.1)**

- **Presión total bruta ( $q_b$ ):** Es la presión vertical total que actúa en la base del cimiento, definida como el cociente entre la carga total actuante, incluyendo el peso del cimiento y aquello que pueda gravitar sobre él, y el área equivalente del cimiento.
- **Presión total neta ( $q_{neta}$ ):** Es la diferencia entre la presión total bruta ( $q_b$ ) y la presión vertical total existente en el terreno ( $q_o$ ) al nivel de la base del cimiento (sobrecarga que estabiliza lateralmente el cimiento). La presión total neta ( $q_{neta}$ ) es, por tanto, el incremento de presión vertical total a que se ve sometido el terreno por debajo del cimiento debido a las cargas de cimentación.
- **Presión efectiva neta ( $q'_{neta}$ ):** Es la diferencia entre la presión efectiva bruta ( $q'_b$ ) y la presión efectiva vertical ( $q'_o$ ) al nivel de la base del cimiento, debida a la sobrecarga. La presión total neta es igual a la efectiva neta ( $q_{neta}=q'_{neta}$ ).
- **Presión vertical de hundimiento ( $q_h, q'_h$ ):** Es la resistencia característica del terreno  $R_K$ , definida tal como se indica en el apartado 2.4.2.6 para el estado límite último de hundimiento. Puede expresarse en términos de presiones totales o efectivas, brutas o netas.
- **Presión vertical admisible ( $q_{adm}, q'_{adm}$ ):** Es el valor de cálculo de la resistencia del terreno ( $R_d$ ). Puede expresarse en términos de presiones totales o efectivas, brutas o netas.
- **Presión vertical admisible de servicio ( $q_s, q'_s$ ):** Es la presión vertical admisible de una cimentación teniendo en cuenta no solo la seguridad frente al hundimiento, sino también

su tolerancia a los asientos; por tanto, igual o menor que la presión vertical admisible. Puede expresarse en términos de presiones totales o efectivas, brutas o netas. (Ministerio de Fomento, 2019, p. 30).

### 3.6.3 Área equivalente de un cimiento (Artículo 4.3.1.3)

Si existiera excentricidad resultado del análisis se deberá considerar tal como lo exige el artículo 4.3.1.3 que reduce el área de la zapata a un área efectiva con las nuevas dimensiones

- Ancho equivalente  $B^*=B-2*e_B$
- Largo equivalente:  $L^*=L-2*e_L$

Donde  $e_B$  y  $e_L$ , son las excentricidades correspondientes a cada dirección de análisis.

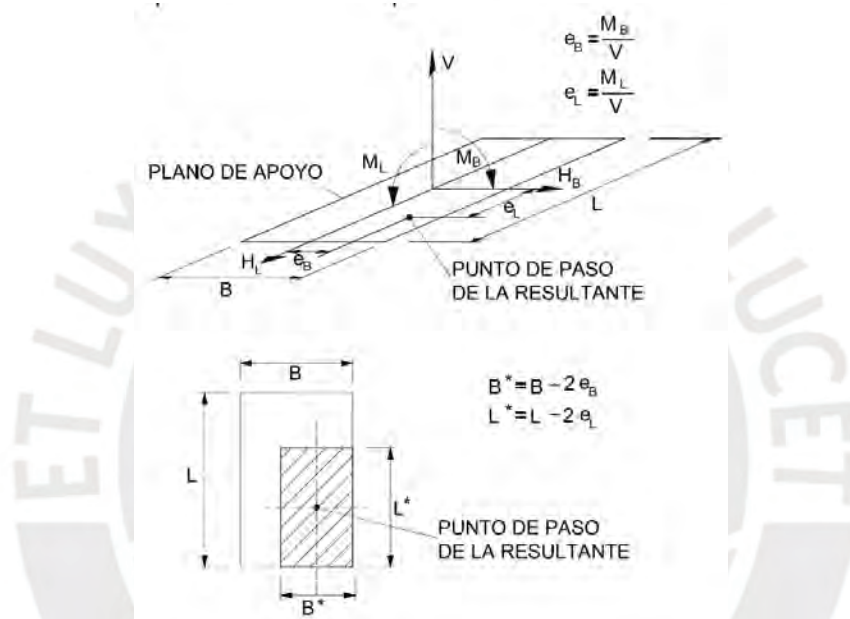


Figura 3.2 Zapata equivalente. Fuente: Documento Básico SE-C Seguridad Estructural Cimientos, 2019

Con estas nuevas dimensiones si fuera necesario se tiene la presión equivalente dada por la siguiente expresión:

$$q_b = \frac{V}{B^* \cdot L^*}$$

Además, deberá calcularse el ángulo “ $\delta$ ” que mide la variación de la resultante de las sollicitaciones respecto a la vertical dadas por las siguientes expresiones:

$$\tan \delta = \frac{H}{V}$$

$$\tan \delta_B = \frac{H_B}{V}$$

$$\tan \delta_L = \frac{H_L}{V}$$

Siendo H la componente horizontal de la resultante de las acciones y  $H_B$ ,  $H_L$  las componentes

de H en dos direcciones ortogonales (habitualmente paralelas a los ejes o direcciones principales de la cimentación)

### 3.6.4 Determinación de la presión de hundimiento (Artículo 4.3.2)

La presión de hundimiento se determina está definida por la siguiente ecuación y fueron extraídas explícitamente de la norma española:

$$q_h = c_K N_c d_c s_c i_c t_c + q_{0K} N_q d_q s_q i_q t_q + \frac{1}{2} B^* \gamma_K N_\gamma d_\gamma s_\gamma i_\gamma t_\gamma$$

Siendo:

- $q_h$  la presión vertical de hundimiento o resistencia característica del terreno  $R_K$ .
- $q_{0K}$  la presión vertical característica alrededor del cimiento al nivel de su base.
- $c_K$  el valor característico de la cohesión del terreno.
- $B^*$  el ancho equivalente del cimiento.
- $\gamma_K$  el peso específico característico del terreno por debajo de la base del cimiento.
- $N_c, N_q, N_\gamma$  los factores de capacidad de carga (factor de cohesión, de sobrecarga y de peso específico).
- $d_c, d_q, d_\gamma$  los coeficientes correctores de influencia para considerar la resistencia al corte del terreno situado encima y alrededor de la base del cimiento.
- $s_c, s_q, s_\gamma$  los coeficientes correctores de influencia para considerar la forma en planta del cimiento.
- $i_c, i_q, i_\gamma$  los coeficientes correctores de influencia para considerar el efecto de la inclinación resultante de las acciones con respecto a la vertical.
- $t_c, t_q, t_\gamma$  los coeficientes correctores de influencia para considerar la proximidad del cimiento a un talud.

Los factores de forma son:

$$s_c = 1,20 \text{ para zapata circular}$$

$$s_c = 1 + 0,2 \frac{B^*}{L^*} \text{ para zapata rectangular}$$

$$s_q = 1,20 \text{ para zapata circular}$$

$$s_q = 1 + 1,5 \text{tg}\phi_k \frac{B^*}{L^*} \text{ para zapata rectangular}$$

$$s_\gamma = 0,6 \text{ para zapata circular}$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 \frac{B^*}{L^*} \text{ para zapata rectangular}$$

Los factores de inclinación son:



$$i_c = \frac{i_q \cdot N_q - 1}{N_q - 1}; \text{ para } \phi_k = 0 : i_c = 0,5 \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{H}{B \cdot L \cdot c_k}} \right)$$

$$i_q = (1 - 0,7 \cdot \text{tg} \delta_B)^3 \cdot (1 - \text{tg} \delta_L)$$

$$i_\gamma = (1 - \text{tg} \delta_B)^3 \cdot (1 - \text{tg} \delta_L)$$

Los factores de capacidad de carga son:

$$N_q = \frac{1 + \text{sen } \phi'}{1 - \text{sen } \phi'} \cdot e^{\pi \cdot \text{tg } \phi'}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \text{cotg } \phi'$$

$$N_\gamma = 1,5(N_q - 1) \cdot \text{tg } \phi'$$

Los factores de profundidad son:

$$d_c = 1 + 0,34 \cdot \text{arctg}(D/B^*)$$

$$d_q = 1 + 2 \frac{N_q}{N_c} (1 - \text{sen} \phi_k)^2 \arctan \frac{D}{B^*}; \text{ para } \phi_k = 0 : d_q = 1$$

$$d_\gamma = 1$$

Los factores de proximidad de talud son:

$$t_c = e^{-2\beta \text{tg} \phi_k}$$

$$t_q = 1 - \text{sen} 2\beta$$

$$t_\gamma = 1 - \text{sen} 2\beta$$

Una vez calculada la resistencia al hundimiento del suelo se utilizarán los factores de reducción para determinar la presión admisible.

Tabla 3.5 Coeficientes de seguridad. Fuente: Ministerio de Fomento (2019)

**Tabla 2.1. Coeficientes de seguridad parciales**

Situación de dimensionado	Tipo	Materiales		Acciones	
		$\gamma_R$	$\gamma_M$	$\gamma_E$	$\gamma_F$
Persistente o transitoria	Hundimiento	3,0 <sup>(1)</sup>	1,0	1,0	1,0
	Deslizamiento	1,5 <sup>(2)</sup>	1,0	1,0	1,0
	Vuelco <sup>(2)</sup>				
	Acciones estabilizadoras	1,0	1,0	0,9 <sup>(3)</sup>	1,0
	Acciones desestabilizadoras	1,0	1,0	1,8	1,0
	Estabilidad global	1,0	1,8	1,0	1,0
	Capacidad estructural	- <sup>(4)</sup>	- <sup>(4)</sup>	1,6 <sup>(5)</sup>	1,0
	Pilotes				
	Arrancamiento	3,5	1,0	1,0	1,0
	Rotura horizontal	3,5	1,0	1,0	1,0
Pantallas	Estabilidad fondo excavación	1,0	2,5 <sup>(6)</sup>	1,0	1,0
	Sifonamiento	1,0	2,0	1,0	1,0
	Rotación o traslación				
	Equilibrio límite	1	1,0	0,6 <sup>(7)</sup>	1,0
	Modelo de Winkler	1	1,0	0,6 <sup>(7)</sup>	1,0
Elementos finitos	1,0	1,5	1,0	1,0	



## Capítulo 4 COMPARACIONES NORMATIVAS Y PRÁCTICAS

En el presente capítulo se realizará la comparación entre las distintas normas, tanto en metodología como en el cálculo de ciertos parámetros.

### 4.1 Comparación entre normas peruanas

#### 4.1.1 Comparación de términos

A continuación, se muestra un cuadro comparativo de los distintos términos empleados en la norma E.030, E.060 y E.050.

Tabla 4.1 Cuadro comparativo de terminología en normas peruanas. Fuente: Propia

Tipos de conceptos	NORMA E.030	NORMA E.060	NORMA E.050
Conceptos referidos a la sollicitación que actúa sobre el suelo.	Presiones actuantes	Presiones de contacto Esfuerzos en el suelo	Presión aplicada Presión de contacto Carga de servicio Cargas aplicadas
Conceptos referidos al máximo permitido que se puede aplicar al suelo.	Esfuerzos admisibles Capacidad portante	Resistencia admisible Presión admisible Capacidad portante	Carga admisible Carga de trabajo Presión admisible Presión de trabajo
Conceptos referidos a lo máximo que resiste el suelo.	-	-	Capacidad de carga Capacidad última

Se distingue principalmente el uso de 3 tipos de conceptos:

- Relacionado a lo que actúa en el suelo: Presiones actuantes, Presiones de contacto, Esfuerzos en el suelo, Presión aplicada, Presión de contacto, Carga de servicio, Cargas aplicadas.
- Relacionado a lo máximo que se puede aplicar al suelo: Esfuerzos admisibles, Resistencia admisible, Presión admisible, Presión de trabajo, Carga admisible, Carga de trabajo.
- Relacionado a lo máximo que resiste teóricamente el suelo: Capacidad portante, Capacidad de carga, Capacidad última.

Se observa que, si bien hay diferencias de terminología entre las tres normas, todos los términos empleados por dichas normas convergen en tres conceptos principalmente, los cuales son los mencionados anteriormente.

#### 4.1.2 Comparación de la presión admisible

f) Norma E.060:

- El artículo 15.2.4 permite incrementar en un 30% el valor de la presión admisible del suelo para cargas temporales (Como sismo o viento)
- El artículo 15.2.5 permite reducir a un 80% las acciones sísmicas de las zapatas sobre el suelo.

g) Norma E.030:

- El artículo 44.2 permite multiplicar por 0.8 las fuerzas obtenidas por análisis sísmico

h) Norma E.050:

- Esta no menciona la reducción al 80% de las acciones sísmicas tal como se menciona en las normas E.030 y E.060; además, tampoco indica la posibilidad de incremento en 30% del valor de la presión admisible tal como lo permite la norma E.060. Cabe resaltar que, esto último resulta en un efecto similar a reducir el factor de seguridad de caso estático de 3 al caso sísmico de 2.5.

De lo anterior se puede afirmar que la norma E.050 no permite ni la reducción al 80% de las acciones sísmicas ni el incremento en un 30% de la presión admisible. Por ello, debido a esta incompatibilidad entre estas tres normas.

#### 4.2 Comparación cualitativa entre normas peruana y extranjeras

##### 4.2.1 Comparación de términos

A continuación, se muestra un cuadro comparativo entre los términos empleados por las distintas normas extranjeras.

*Tabla 4.2 Cuadro comparativo de terminología en normas peruana y extranjeras. Fuente: Propia*

NORMA E.050	NORMAS CHILENAS	NORMA MEXICANA	NORMA ESPAÑOLA
Presión aplicada	Presión aplicada	Presión vertical	Presión total bruta
Presión de contacto	Carga aplicada	Carga aplicada	Carga aplicada
Carga de servicio			
Cargas aplicadas			
Carga admisible	Presión límite	Capacidad de carga	Presión vertical admisible
Carga de trabajo	Presión de contacto	reducida	de servicio
Presión admisible	admisible		Carga admisible
Presión de trabajo			
Capacidad de carga	Capacidad de soporte	Capacidad de carga	Presión vertical de
Capacidad última		neta	hundimiento

Se observa que, entre ciertas normativas, hay términos en común empleados para un mismo concepto, por lo que más en común serán los que se sugerirán para estandarizar conceptos.

Los términos sugeridos, con base en la tabla anterior, serán: Presión aplicada, Presión admisible y Capacidad de carga.

#### 4.2.2 Comparación de la Capacidad de carga

Por otro lado, para el cálculo de la capacidad de carga, cada norma emplea una ecuación distinta dependiendo del tipo de suelo. A continuación, se muestra la recopilación de las formulaciones utilizadas por cada norma.

- Norma peruana – Suelos y Cimentaciones:

Suelo cohesivo:

$$q_d = s_c i_c c N_c$$

Suelo granular:

$$q_d = i_q \gamma_1 D_f N_q + 0,5 s_\gamma i_\gamma \gamma_2 B' N_\gamma$$

- Norma chilena - NCh179: 1980. Mecánica de suelos

$$q_{ult} = s_c d_c c N_c + s_q d_q \gamma D_f N_q + s_\gamma d_\gamma \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$$

- Norma mexicana - Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones

Suelo cohesivo:

$$r = [C_u * N_c] * F_R + p_v$$

Suelo granular:

$$r = \left[ \bar{p}_v * (N_q - 1) + \frac{\gamma * B * N_\gamma}{2} \right] * F_R + p_v$$

- Norma española - Seguridad Estructural Cimientos

$$q_h = c_K N_c d_c s_c i_c t_c + q_{0K} N_q d_q s_q i_q t_q + \frac{1}{2} B * \gamma_K N_\gamma d_\gamma s_\gamma i_\gamma t_\gamma$$

A continuación, se realizará la comparación cualitativa entre las normas: En primer lugar, se observa similitudes entre las expresiones propuestas por la norma peruana y chilena, con la primera diferencia de la incorporación del factor de forma  $S_q$  para el primer sumando del suelo granular en la norma chilena (Factor que no está presente en la norma peruana); además, una

segunda diferencia, es que los factores de profundidad  $d_c$ ,  $d_q$  y  $d_\gamma$  están presentes solo en la norma chilena, así como los factores de inclinación  $i_c$ ,  $i_q$  e  $i_\gamma$  están presentes solo en la norma peruana.

Respecto a la norma española, esta resulta emplear una expresión más extensa que las normas peruana y chilena pues, si bien incorpora factores considerados por ambas (Factores de capacidad de carga  $N$ , Factores de forma  $S$ , Factores de inclinación  $i$ , Factores de profundidad  $d$ ) esta normativa incorpora los Factores de proximidad de talud  $t$ . Entonces, esta norma resulta ser una síntesis de las normas peruana y chilena, más el agregado de los factores  $t$ .

En cuanto a la norma mexicana, las expresiones que esta propone resultan ser muy distintas de lo que se emplea en las normativas peruana, chilena y española, esto permite afirmar que la norma mexicana emplea otra metodología respecto de las otras normas mostradas en el presente trabajo, cuya única similitud resulta en los Factores de capacidad de carga  $N$ .

### **4.3 Comparación cuantitativa entre normas peruana y extranjeras**

Para visualizar cuantitativamente la variación que existe entre las normas se desarrollará un ejemplo aplicativo.

#### **4.3.1 Ejemplo aplicativo**

En el presente ejemplo, se considerará una zapata con dimensiones de 1.20 m y 1.45 m, cimentada a una profundidad de 1.5 m. Se ha cimentado sobre un suelo fino donde no se encontró napa freática con cohesión  $c = 0.80 \text{ kg/cm}^2$ , un ángulo de fricción interna  $\phi = 0^\circ$  un peso volumétrico de  $1.8 \text{ ton/m}^3$ . Finalmente, se tienen las siguientes cargas aplicadas:

- $Q_v = 21.34 \text{ ton}$
- $Q_h = 0.64 \text{ ton}$
- $M = 1.65 \text{ ton-m}$

##### **i) Desarrollo con la Norma peruana**

La norma explica que para el caso de suelos cohesivos se utilizará la siguiente expresión:

$$q_d = s_c i_c c N_c$$

Según la práctica usual se realiza una diferenciación entre los casos superpuestos y no superpuestos los cuales dependen de la diferencia de signos entre la carga horizontal y el momento aplicado. En este caso se tiene un caso no superpuesto, por lo que se desprejará el factor  $i_c$ . Además, se está considerando un caso sísmico, por lo tanto, se utilizará el 80% de la cohesión.

$$e = \frac{1.65 \text{ ton} - \text{m}}{21.34 \text{ ton}} = 0.08 \text{ m}$$

$$s_c = 1 + 0.2 \cdot \frac{1.20 - 2 \cdot 0.08}{1.45} = 1.14$$

$$q_d = 5.14 \cdot 1.14 \cdot 0.8 \cdot (0.8) = 3.76 \frac{kg}{cm^2}$$

$$q_a = \frac{4.70}{2.5} = 1.51 \frac{kg}{cm^2}$$

j) Desarrollo con la Norma chilena

La norma no especifica que fórmula utilizar, pero, según lo que se ha explicado en acápites anteriores, se suele utilizar la siguiente ecuación.

$$q_{ult} = s_c d_c c N_c + s_q d_q \gamma D_f N_q + s_\gamma d_\gamma \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$$

En este caso, se incluirá el factor de profundidad planteado por Meyerhof.

$$e = 0.08 \text{ m}$$

$$s_c = 1.14$$

$$d_c = 1 + 0.2 \cdot \frac{Df}{L} = 1 + 0.2 \cdot \frac{1.5}{1.45} = 1.21$$

Se despreciará el efecto del segundo sumando, igual que en la norma peruana, ya que su aporte es muy reducido.

$$q_d = 5.14 \cdot 1.14 \cdot 1.21 \cdot 0.8 = 5.67 \frac{kg}{cm^2}$$

En la Norma chilena no se especifican factores de seguridad; sin embargo, la práctica usual recomienda utilizar un factor de 3, para un caso estático, y amplificar el resultado en un 33% para el caso sísmico.

$$q_a = \frac{5.67}{3} = 1.89 \frac{kg}{cm^2}$$

k) Desarrollo con la Norma mexicana

En este caso, la norma no calcula un valor para la presión última del suelo, sino que calcula un valor para la presión admisible directamente.

Para suelos cohesivos se tiene la siguiente fórmula.

$$r = [C_u * N_c] * F_R + p_v$$

El  $F_R$  depende del tipo de suelo, según la zona, en que se va a construir y el  $p_v$  depende del peso volumétrico del suelo.

$$F_R = 0.35$$



$$c_u = 0.80 \frac{kg}{cm^2}$$

$$N_c = 5.14 \cdot \left(1 + 0.25 \cdot \frac{Df}{B} + 0.25 \cdot \frac{B}{L}\right)$$

$$N_c = 5.14 \cdot \left(1 + 0.25 \cdot \frac{1.5}{(1.2 - 2 \cdot 0.08)} + 0.25 \cdot \frac{(1.2 - 2 \cdot 0.08)}{1.45}\right) = 7.91$$

$$p_v = \gamma \cdot Df = 1.8 \frac{ton}{m^3} \cdot 1.5 m = 2.7 \frac{ton}{m^2} = 0.27 \frac{kg}{cm^2}$$

$$r = (0.80 \cdot 7.91) \cdot 0.35 + 0.27 = 2.48 \frac{kg}{cm^2}$$

Para realizar una comparación con otras normas se puede asumir el factor  $[C_u * N_c]$  como una resistencia del suelo.

$$q_d = 7.91 \cdot 0.80 = 6.33 \frac{kg}{cm^2}$$

#### 1) Desarrollo con la Norma española

La fórmula utilizada es la siguiente.

$$q_h = c_K N_c d_c s_c i_c t_c + q_{0K} N_q d_q s_q i_q t_q + \frac{1}{2} B^* \gamma_K N_\gamma d_\gamma s_\gamma i_\gamma t_\gamma$$

Para comparar el resultado con los demás, se despreciará el efecto del segundo sumando igual que en los casos anteriores.

$$N_c = 5.14$$

$$s_c = 1.14$$

$$i_c = 0.5 \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{H}{B' \cdot L' \cdot c}}\right) = 0.5 \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{0.64}{1.05 \cdot 1.45 \cdot 0.8}}\right) = 0.99$$

$$d_c = 1 + 0.34 \cdot \arctan\left(\frac{Df}{B'}\right) = 1 + 0.34 \cdot \arctan\left(\frac{1.5}{1.05}\right) = 1.33$$

$$t_c = 1$$

$$q_d = 0.8 \cdot 5.14 \cdot 1.33 \cdot 1.14 \cdot 0.99 \cdot 1 = 6.16 \frac{kg}{cm^2}$$

$$q_a = \frac{6.16}{3} = 2.05 \frac{kg}{cm^2}$$

Tabla 4.3 Cuadro resumen para la zapata estudiada. Fuente: Propia

ZAPATA Z-1					
B (m)=	1.20	L (m)=	1.45	Df (m)=	1.50
Qv (ton)=	21.34	Qh (ton)=	0.64	Mv (ton.m)=	1.65
RESUMEN					
Capacidad de carga	Norma peruana	Norma chilena	Norma mexicana	Norma española	
Última	3.76	5.68	6.33	6.16	
Admisible	1.51	1.89	2.48	2.05	

Como se puede ver, el valor obtenido con la Norma peruana es el más conservador para esta situación en particular. Para complementar el ejemplo desarrollado se ha generado un gráfico y unas tablas que presentan resultados con cimentaciones donde se varía la relación B/L para diez zapatas distintas.

#### 4.3.2 Predicción de las normas y comparación de resultados:

A continuación, se varió la relación B/L, pero se mantuvo las mismas condiciones del terreno para verificar su impacto y se obtuvo las siguientes capacidades de carga última:

Tabla 4.4 Presiones últimas para las diez zapatas generadas según cada norma variando el valor de B/L. Fuente: Propia

ZAPATAS	Dimensiones		Relación B/L	Capacidades últimas de carga por norma			
	B (m)	L (m)		Peruana	Chilena	Mexicana	Española
Z-1	1.20	1.20	1.000	3.86	6.04	6.48	6.30
Z-2	1.20	1.25	0.960	3.84	5.95	6.45	6.27
Z-3	1.20	1.30	0.923	3.82	5.87	6.41	6.24
Z-4	1.20	1.35	0.889	3.80	5.80	6.38	6.21
Z-5	1.20	1.40	0.857	3.78	5.74	6.35	6.19
Z-6	1.20	1.45	0.828	3.76	5.68	6.33	6.16
Z-7	1.20	1.50	0.800	3.75	5.62	6.30	6.14
Z-8	1.20	1.55	0.774	3.73	5.57	6.28	6.12
Z-9	1.20	1.60	0.750	3.72	5.52	6.26	6.10
Z-10	1.20	1.65	0.727	3.71	5.48	6.24	6.08

Además, se generó un gráfico para visualizar mejor las diferencias entre normas partiendo de la tabla mostrada anteriormente:

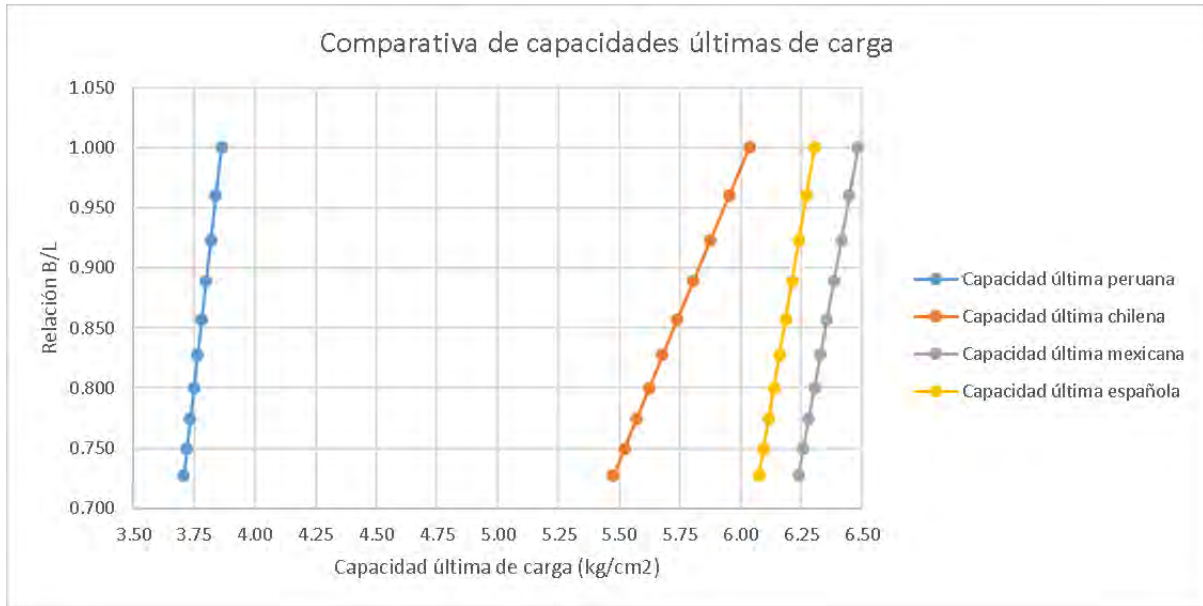


Figura 4.1 Variación de la capacidad de carga última variando la relación B/L en un terreno cohesivo. Fuente: Propia

También se varió la relación B/L y se mantuvo las mismas condiciones del terreno para verificar su impacto y se obtuvo las siguientes cargas admisibles:

Tabla 4.5 Cargas admisibles para las diez zapatas generadas según cada norma variando el valor de B/L. Fuente: Propia

ZAPATAS	Dimensiones		Relación B/L	Capacidades de carga admisible por norma			
	B (m)	L (m)		Peruana	Chilena	Mexicana	Española
Z-1	1.20	1.20	1.000	1.55	2.01	2.54	2.10
Z-2	1.20	1.25	0.960	1.54	1.98	2.53	2.09
Z-3	1.20	1.30	0.923	1.53	1.96	2.51	2.08
Z-4	1.20	1.35	0.889	1.52	1.93	2.50	2.07
Z-5	1.20	1.40	0.857	1.51	1.91	2.49	2.06
Z-6	1.20	1.45	0.828	1.51	1.89	2.48	2.05
Z-7	1.20	1.50	0.800	1.50	1.87	2.48	2.05
Z-8	1.20	1.55	0.774	1.49	1.86	2.47	2.04
Z-9	1.20	1.60	0.750	1.49	1.84	2.46	2.03
Z-10	1.20	1.65	0.727	1.48	1.83	2.45	2.03

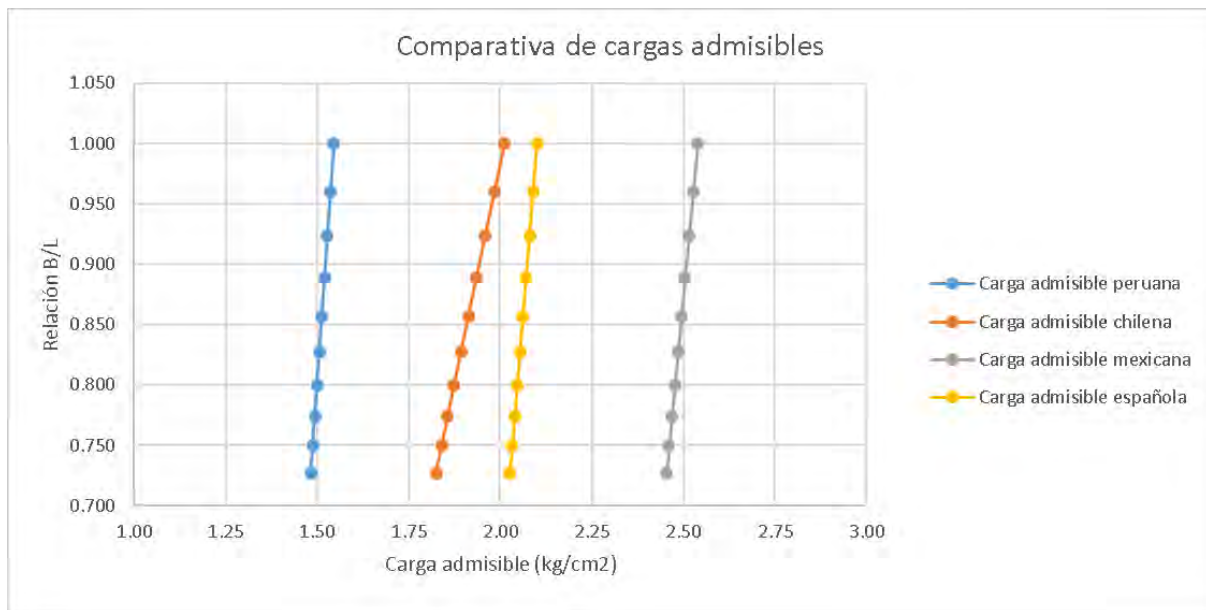


Figura 4.2 Variación de la carga admisible variando la relación B/L en un terreno cohesivo. Fuente: Propia

A continuación, se realizará la comparación cualitativa entre las normas:

En el ejemplo desarrollado, se observó que la norma peruana es la más simplificada y al mismo tiempo la más conservadora. La norma chilena y la mexicana son similares, ya que consideran factores de corrección similares (de forma y profundidad); sin embargo, los resultados de la norma chilena son más conservadores en lo que respecta a presión admisible.

En la Figura 4.1 se puede ver que, para las mismas condiciones de suelo cohesivo, la norma peruana es la más conservadora cuando se varía la relación B/L; además, de tener una pendiente bastante similar a la de las normas mexicana y española. La norma chilena posee una variación mayor cuanto menor es la relación B/L.

Sin embargo, a pesar de que los resultados muestran que una norma es más conservadora, no se puede afirmar la mayor precisión de una respecto de otra debido a que para ello es necesaria la realización de ensayos, lo cual escapa de los límites de la presente investigación.

Finalmente, la norma peruana, en lo que respecta a presión admisible, presenta una metodología sencilla y con resultados óptimos para el diseño. Ya que, como se vio en el ejemplo desarrollado, la presión admisible entre la norma peruana y la chilena es bastante similar y, puesto que Chile es un país similar al nuestro debido a la alta actividad sísmica y cuyas cimentaciones han demostrado un comportamiento óptimo en los sismos de los últimos años, se puede afirmar que los diseños realizados con los resultados de la norma peruana son aceptables.

## Capítulo 5 PROPUESTAS

### 5.1 Propuestas referentes a normas nacionales

A continuación se presentan los cambios que se proponen para las normas nacionales de Perú.

#### 5.1.1 Cambios propuestos a la norma E.030

En la presente norma no se propone ningún cambio en específico.

#### 5.1.2 Cambios propuestos a la norma E.050

##### a) Primera propuesta

En el artículo 5, acápite 5.15, se menciona:

*“5.15. Carga inducida por sismo.- Ver NTE E.030.”* (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 24).

Se propone aclarar la reducción de la sollicitación sísmica al 80% modificando dicho artículo tal como se muestra a continuación:

*5.15. Carga inducida por sismo.- La sollicitación sísmica especificada en la NTE E.030 (A nivel de resistencia) reducida al 80%.*

Esto para asemejar la norma E.050 respecto de la E.060 respecto a la reducción al 80% para sollicitación sísmica para la verificación de presiones admisibles.

##### b) Segunda propuesta

Se propone añadir en el artículo 5, como un acápite adicional, el término de Capacidad portante pues las 3 normas lo emplean:

*5.10. Capacidad portante.- Sinónimo de presión admisible*

Esto debido a que el término Capacidad portante es ampliamente usado y la norma E.050 no menciona nada en específico respecto al presente término.

##### c) Tercera propuesta

En el artículo 21 se tienen los incisos 21.1. y 21.2. con la siguiente información:

*“21.1. Para cargas estáticas: 3,0”* (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 39).

*“21.2. Para sollicitación máxima de sismo o viento (la que sea más desfavorable): 2,5”* (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018, p. 39).

El cambio que se propone para este artículo es retirar los incisos 21.1. y 21.2. y emplear un único artículo mencionando lo siguiente:

*Artículo 21.- Factor de seguridad frente a una falla de corte será de 3,0 para cualquier tipo de sollicitación (No reducir la cohesión ni ángulo de fricción interna para casos de*



*cargas sísmicas ni viento).*

Lo anterior se propone debido a que las propiedades del suelo, tales como la cohesión y el ángulo de fricción, se reducen para cargas dinámicas y temporales. Esto también se hace en la práctica, además de emplear un factor de seguridad de 2,5; sin embargo, esto es similar a simplemente emplear un factor de seguridad de 3,0 y ya no se aplicaría la reducción al 80% de la cohesión ni de 2° del ángulo de fricción interna dado que esto no está normado.

La reducción de la cohesión y ángulo de fricción resultan ser correctos para casos de cargas dinámicas (Tales como sismo o viento), por lo que resulta correcto lo que actualmente se tiene en la norma y lo que se hace en la práctica; sin embargo, la propuesta mencionada en el párrafo superior se menciona como una solución práctica al problema de incompatibilidad entre normas.

d) Cuarta propuesta

En el artículo 22, se propone incluir un acápite 22.3 que mencione lo siguiente:

*22.3. Si la presión admisible obtenida ha sido mediante solicitudes de sismo o viento, se permite amplificar la presión admisible obtenida del acápite 22.2 en un 30%.*

Esto para asemejar la norma E.050 respecto de la E.060 respecto al aumento del 30% para presión admisible.

**5.1.3 Cambios propuestos a la norma E.060**

En la presente norma no se propone ningún cambio en específico.

**5.2 Propuesta referente a normas internacionales**

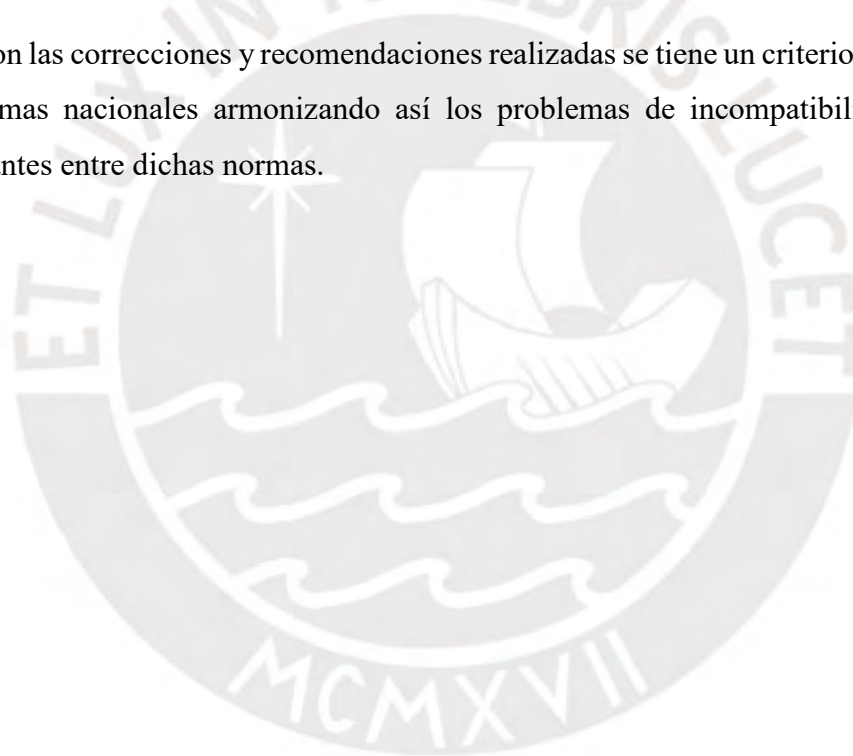
Tal como se muestra en el desarrollo del ejemplo aplicativo del acápite 4.3.1 y en la Tabla 4.4, así como en la Figura 4.1, se observa que la norma peruana E.050 resulta ser más conservadora y permite obtener resultados para presiones admisibles. En los sismos de los últimos años, las cimentaciones de edificaciones basadas en norma chilena, han tenido resultados satisfactorios, según Paillao D. por lo que según se observa, los valores de capacidad de carga última y cargas admisibles para la norma peruana, son aún más conservadores que la norma chilena, motivo por el cual no se realizará algún cambio en la presente norma E.050 ya que se obtendrá un desempeño igual o mejor que las cimentaciones basadas en la norma chilena.

## **Capítulo 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se ha visto que en la norma E.060 se considera un incremento del 30% del esfuerzo admisible del suelo lo cual no está contemplado explícitamente en la norma E.050, por lo cual se ha concluido en sugerir una modificación de los artículos mencionados en el capítulo 5 de la E.050 mientras que para las normas E.030 y E.060 se decidió no proponer cambio alguno.

La norma peruana resulta ser más conservadora que las normas mexicana, chilena y española, además de ser la que emplea menos factores de corrección, siendo así más simple en su aplicación; concluyendo que resulta más adecuado aplicar la norma peruana sin modificaciones respecto a las extranjeras (solo aplicando las propuestas del capítulo 5).

Finalmente con las correcciones y recomendaciones realizadas se tiene un criterio más uniforme entre las normas nacionales armonizando así los problemas de incompatibilidades que se presentaban antes entre dichas normas.



## Capítulo 7 BIBLIOGRAFÍA

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018) *Norma E.030 Diseño Sismorresistente*. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018) *Norma E.050 Diseño Sismorresistente*. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2009) *Norma E.060 Diseño Sismorresistente*. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Villalobos, F. (2000). Análisis teórico – experimental de la capacidad de soporte de fundaciones superficiales apoyadas sobre suelo arenoso, Santiago, Chile, 9-11.
- AASHTO (2002). Standard specifications for highway bridges (17th edition).
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE), México. Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones.
- Instituto Nacional de Normalización (INN), Chile. NCh179: 1980. Mecánica de suelos – Símbolos, unidades y definiciones.
- Instituto Nacional de Normalización (INN), Chile. NCh433: 1996. Diseño sísmico de edificios.
- Instituto Nacional de Normalización (INN), Chile. NCh3171: 2010. Diseño estructural - Disposiciones generales y combinaciones de cargas.
- Instituto Nacional de Normalización (INN), Chile. NCh2369: 2002. Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.
- Paillao, D. (2016). Análisis de la capacidad de soporte sísmica de fundaciones superficiales apoyadas en suelos granulares: Comparativa entre formulaciones basadas en métodos de equilibrio y análisis límite y la práctica tradicional chilena. Memoria para optar por el título de Ingeniero civil. Santiago de Chile: Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería.
- Sieffert and Bay-Grees (2000). Comparison of European bearing capacity calculation methods for shallow foundations. Proc. Instn Civ. Engrs. Geotech. Engng. London.
- Moffat, R. (2012). Capacidad de soporte en fundaciones superficiales. Material del curso de Fundaciones. Santiago: Universidad de Chile.
- Ministerio de Fomento (2019) *Seguridad Estructural Cimientos*. Madrid, España: Documento Básico SE-C.
- Das Henderson, Braja M. (2011) *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (7ma Ed.)*. Querétaro, México: Cengage Learning.

- Das Henderson, Braja M. (2014) *Fundamentos de ingeniería geotécnica (4ta Ed.)*. Querétaro, México: Cengage Learning.

