

Las *Series del Instituto de Ingeniería* describen los resultados de algunas de las investigaciones más relevantes de esta institución. Con frecuencia son trabajos in extenso de artículos que se publican en revistas especializadas, memorias de congresos, etc.

Cada número de estas Series se edita con la aprobación técnica del Comité Editorial del Instituto, basada en la evaluación de árbitros competentes en el tema, adscritos a instituciones del país y/o el extranjero.

Actualmente hay tres diferentes Series del Instituto de Ingeniería:

SERIE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Incluye trabajos originales sobre investigación y/o desarrollo tecnológico. Es continuación de la Serie Azul u Ordinaria, publicada por el Instituto de Ingeniería desde 1956, la cual actualmente tiene nueva presentación y admite textos en español e inglés.

SERIE DOCENCIA

Está dedicada a temas especializados de cursos universitarios para facilitar a estudiantes y profesores una mejor comprensión de ciertos temas importantes de los programas de estudio.

SERIE MANUALES

Abarca manuales útiles para resolver problemas asociados con la práctica profesional o textos que describen y explican el estado del arte o el estado de la práctica en ciertos temas. Incluye normas, manuales de diseño y de laboratorio, reglamentos, comentarios a normas y bases de datos.

Las *Series del Instituto de Ingeniería* pueden consultarse gratuitamente desde la dirección electrónica del Instituto (II UNAM), <http://www.ii.unam.mx> (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarnpublicacion.aspx>) y pueden grabarse o imprimirse en formato PDF desde cualquier computadora.

Cargas vivas máximas en función del área tributaria para edificaciones en el Distrito Federal

ISBN: 978-607-02-4972-0

SONIA E. RUIZ GÓMEZ
ERIC GUTIÉRREZ CASTILLO

SID 695
ABRIL 2015

D.R. © UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2015
Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria, CP 04360, México, DF
Primera edición, abril 2015
ISBN 978-607-02-4972-0

CARGAS VIVAS MÁXIMAS EN FUNCIÓN DEL ÁREA TRIBUTARIA PARA EDIFICACIONES EN EL DISTRITO FEDERAL

SONIA E. RUIZ GÓMEZ¹

ERIC GUTIÉRREZ CASTILLO²

¹ Investigadora Titular. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar s/n, CU, Insurgentes Sur 3000, C.P. 04510, México D. F., Tel 56233654, SRuizG@iingen.unam.mx

² Estudiante de Posgrado. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar s/n, CU, Insurgentes Sur 3000, C.P. 04510, México D. F.

CONTENIDO

RESUMEN.....	<i>iii</i>
ABSTRACT.....	<i>iv</i>
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodología.....	4
2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y PROCESO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA ...	6
2.1 Cargas vivas.....	6
2.1.1 <i>Carga sostenida</i>	6
2.1.2 <i>Carga extraordinaria</i>	8
2.1.3 <i>Carga total máxima</i>	10
2.2 Proceso de simulación numérica usando el método de Monte Carlo.....	11
2.3 Probabilidades de excedencia.....	20
3. CUATRO PROPUESTAS DE REDUCCIÓN DE VALORES CARGAS VIVAS MÁXIMAS EN FUNCIÓN DEL ÁREA PARA EL DISEÑO DE EDIFICACIONES, CONSIDERANDO UNA PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE APROXIMADAMENTE 50%	22
3.1 Análisis de cargas vivas en oficinas.....	23
3.2 Análisis de cargas vivas en aulas.....	28
3.3 Análisis de cargas vivas en departamentos-habitación multifamiliares.....	32
3.4 Análisis de cargas vivas en cuartos de hotel.....	36
4. DOS PROPUESTAS DE REDUCCIÓN DE VALORES DE CARGAS VIVAS MÁXIMAS EN FUNCIÓN DEL ÁREA.....	42
4.1 Expresiones sobre la reducción de carga con probabilidad de excedencia aproximadamente constante.....	42
4.2 Comparación de las expresiones propuestas versus los valores que recomiendan el ASCE/SEI 7-10 y las NTC-2004.....	46
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
AGRADECIMIENTOS.....	53
RAFERENCIAS.....	54

RESUMEN

El Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTC-2004) recomiendan cargas de diseño para estructuras según su uso; sin embargo, dichas cargas no consideran una probabilidad de excedencia constante con respecto al área tributaria. En el presente estudio se proponen dos expresiones que son útiles para reducir las cargas máximas de diseño en edificios para áreas tributarias mayores de 36 m². Las expresiones proporcionan valores de cargas máximas de diseño con una probabilidad de excedencia aproximadamente igual a 50%. La primera expresión es aplicable al diseño de oficinas y de aulas, mientras que la segunda se aplica para el diseño de departamentos multifamiliares y cuartos de hotel. Finalmente, se proponen algunas modificaciones a los valores de las cargas medias y máximas de diseño que recomiendan en los incisos a, b y c de la tabla 6.1 de las NTC-2004.

ABSTRACT

The current Mexico City Building Code and its Complementary Technical Norms related to Criteria and Actions for the Design of Structures (NTC-2004) recommend nominal loads for the design of structures in accordance with their use; however, these loads do not consider uniform probability of exceedance for different tributary areas. In the present study, two expressions to reduce the design loads for tributary areas larger than 36 m^2 are proposed. The expressions give place to design load values with an almost constant probability of exceedance of 50%. The first expression can be applied for the design of offices and classrooms, while the second one for the design of multi-familiar apartments and hotel rooms. Finally, some modifications to the design mean and maximum live load values specified in table 6.1 of the NTC-2004 are proposed.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los reglamentos de diseño del mundo, incluyendo el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, utilizan el formato basado en factores de carga y resistencia (“Load and Resistance Factor Design”, LRFD por sus siglas en inglés). Este formato implica usar valores de cargas de diseño así como de factores de carga y de resistencia de manera que se obtengan sistemas con niveles de confiabilidad pre-establecidos. Los factores de carga que sean especificarán en la próxima versión de las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones (NTC) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) se obtuvieron con base en un estudio (Bojórquez Mora y Ruiz Gómez, 2014a, b) que establece como hipótesis que la probabilidad de excedencia de las cargas actuantes es de 50% para cualquier valor del área tributaria. Debido a esta hipótesis es necesario que los valores de las cargas nominales que se recomienden en la próxima versión del RCDF para el diseño de las edificaciones sean tales que las cargas actuantes tengan una probabilidad de excedencia lo más cercana a 50%, de manera que sean congruentes con los factores de carga que se especificarán en las próximas NTC. Debido a lo anterior, el presente estudio se enfoca a proponer valores de las cargas de diseño, tomando en cuenta la reducción como función del área, de manera que su probabilidad de excedencia sea aproximadamente de 50%.

Además, el establecer una probabilidad de excedencia constante de las cargas actuantes con respecto a sus valores nominales de diseño da como resultado que algunos parámetros, como la confiabilidad estructural, sean invariantes con respecto al área tributaria, por lo que es deseable que las normas de diseño recomienden valores de cargas para el diseño de edificaciones, que tengan una probabilidad de excedencia uniforme con respecto a sus valores nominales de diseño.

1.1 Antecedentes

Las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTC-2004) recomiendan valores de cargas de diseño para diferentes destinos de piso, por ejemplo, para oficinas, cuartos de hotel, estacionamientos, etc. Dichos valores se listan en la tabla 6.1 de dichas normas. Éstas permiten que, para algunos destinos de piso, el valor de la carga máxima de diseño (W_m) se reduzca en función del inverso de la raíz cuadrada del área tributaria (\sqrt{A}) para elementos con $A \geq 36 \text{ m}^2$. La reducción de la carga de diseño en función de \sqrt{A} se debe

a que la varianza de la carga (σ^2) es inversamente proporcional al área cargada. Esto fue observado originalmente por Rosenblueth (1959), y posteriormente ha sido comprobado por varios investigadores (Jauffred, 1960; Peir, 1971; McGuire y Cornell, 1974; Ellingwood y Culver, 1977; Soriano Martínez et al, 2001). Mientras menor es el área tributaria, la varianza de la carga por unidad de área es mayor y por lo tanto crece el valor de la carga de diseño. Con base en lo anterior, las NTC-2004 recomiendan que la carga máxima de diseño para áreas pequeñas sea constante y aproximadamente igual a la que corresponde a un área tributaria de 36 m² (que se puede representar, por ejemplo, por un tablero de 6 m x 6 m).

Las NTC-2004 permiten reducir el valor de la carga máxima para el diseño de los siguientes elementos:

- 1) Elementos de casa-habitación, departamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, internados de escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares. En este caso el valor propuesto para la carga de diseño, tomando en cuenta la reducción como función del área es:

$$100+420/\sqrt{A} \quad ; \quad \text{en kg/m}^2 \quad (1.1)$$

- 2) Elementos de oficinas, despachos y laboratorios. En este caso el valor propuesto para la carga de diseño, tomando en cuenta la reducción como función del área es:

$$110+850/\sqrt{A} \quad ; \quad \text{en kg/m}^2 \quad (1.2)$$

Después de revisar la literatura se encontró que en lineamientos de otros países (EEUU, Argentina, etc.) se permite que se reduzca W_m en función del área, para un gran número de destinos de piso. Por ejemplo, el documento ASCE/SEI 7-10, en su sección 4.8, permite reducir la carga de diseño para los destinos de piso que se listan en la tabla 4-1 de ese documento, excepto para estacionamientos, lugares para reuniones públicas, algunos casos de losas en una dirección, y para elementos con cargas de diseño mayores que 479 kg/m². En estos casos no se permite la reducción de la carga de diseño por unidad de área, en función del área tributaria, debido a que su varianza con esta última es casi constante. Por ejemplo, las cargas en los estacionamientos se deben a vehículos estacionados de manera ordenada, y no como sucede en las oficinas en donde las cargas presentan alta variación espacial; además, los estacionamientos normalmente están llenos (Wen y Yeo, 2000).

Con el fin de definir los valores nominales de carga viva máxima para el diseño de estructuras, el Instituto de Ingeniería de la UNAM ha venido desarrollando, a partir de 1997, estudios sobre cargas vivas máximas en edificios con distintas ocupaciones. Los estudios incluyen mediciones de cargas vivas sostenidas instantáneas en edificios con usos de oficinas, salones de clase, departamentos-habitación multifamiliares y cuartos de hotel. Los resultados de cada estudio proponen una carga de diseño constante para áreas de proyecto menores de 36 m², mientras que para áreas mayores se proponen expresiones matemáticas sencillas para reducir la carga de diseño en función del área.

Los estudios antes mencionados siguen los criterios generales establecidos por Peir y Cornell (1973), McGuire y Cornell (1974), Ellingwood y Culver (1977), Chalk y Corotis (1980) y Wen (1977, 1979); sin embargo, se utiliza información estadística correspondientes a cargas sobre edificaciones localizadas en la ciudad de México. En todos los casos se utiliza el Método de Monte Carlo. El algoritmo implica sumar los valores instantáneos de la carga sostenida y la carga extraordinaria máxima suponiendo que dichos valores se presentan simultáneamente en cualquier instante de la vida útil de la estructura, y posteriormente, encontrar la función de distribución de probabilidades del valor máximo de esta sumatoria. Se supone que ambos tipos de carga (sostenida y extraordinaria) están gobernados por un proceso de Poisson. En todos los casos se supone que la intensidad de las carga tanto sostenida instantánea como extraordinaria presenta una función de distribución (fdp) Gamma, y que la correspondiente a los valores máximos de las cargas totales es Extrema Tipo I. Los parámetros estadísticos de las cargas sostenidas se obtuvieron a partir de pesar directamente los muebles, objetos y personas que actuaban en un instante dado sobre las edificaciones. El total de área analizada para cargas sostenidas en oficinas fue de 14,890 m² (Soriano Martínez, et al, 2001), para aulas se estimaron cargas sostenidas en un área de 13,700 m² (Sampayo Trujillo y Ruiz Gómez, 2001), para departamentos multifamiliares de 13,120 m² (Guillén Osorio y Ruiz Gómez, 2013), y para cuartos de hotel en un área de 14,542 m² (Guillén Osorio, 1998; Gutiérrez Castillo, 2013). El área cubierta en cada uno de estos casos es pequeña comparada con la que presentan otros estudios (por ejemplo, Culver (1976) realiza mediciones de cargas sobre oficinas en un área de 53,900 m²); sin embargo, es suficientemente grande como para conducir a resultados de cargas máximas de diseño similares a los que se calculan cuando se cubren áreas mayores. Esto se deduce a partir de comparaciones de cargas de diseño hechas por Ruiz y Soriano Martínez (1997), Ruiz y Sampayo Trujillo (1977), así como a partir del presente estudio.

Algunos de los resultados de los estudios realizados en el Instituto de Ingeniería, UNAM se han adoptado como valores de diseño en las Normas Técnicas Complementarias para Criterios y Acciones para Diseño Estructural de las Edificaciones (NTC-2004); sin embargo, es necesario advertir que dichas cargas de diseño no establecen como requisito que su probabilidad de excedencia, para cualquier área tributaria, tenga un valor constante, de ahí la necesidad de realizar el presente estudio.

1.2 Objetivos

El objetivo general del presente estudio es proponer valores de las cargas de diseño, tomando en cuenta la reducción como función del área tributaria (para $A \geq 36 \text{ m}^2$), con probabilidades de excedencia lo más cercano posible a 50% o menores, que sean aplicables a algunos de los destinos de piso que se indican en la tabla 6.1 de las NTC-2004, específicamente para el diseño de oficinas, aulas, departamentos multifamiliares y cuartos de hotel. En este estudio las probabilidades de excedencia (50%) se refieren a los valores máximos de carga durante la vida útil de la estructura.

La forma general de las leyes de reducción que se adopta en el presente estudio tiene la misma forma que la que recomiendan las NTC-2004, que es como sigue:

$$W_m(c_a + c_b / \sqrt{A}) \quad (1.3)$$

La forma de reducción expresada por la ec 1.3 se adopta en este estudio debido a que se ha comprobado que la carga de diseño varía en función de \sqrt{A} , dado que la varianza de la carga (σ^2) es inversamente proporcional al área cargada (Rosenblueth (1959), Jauffred, 1960; Peir, 1971; McGuire y Cornell, 1974; Ellingwood y Culver, 1977; Soriano Martínez et al, 2001).

El objetivo particular de este estudio es proponer los valores de los parámetros c_a y c_b , de manera que la probabilidad de que la carga máxima exceda el valor de diseño sea lo más cercano posible a 50%.

1.3 Metodología

Con el fin de proponer el valor de los parámetros c_a y c_b que intervienen en la ec 1.3, se realizan los siguientes pasos:

- 1) Se cuenta con un modelo probabilista de cargas totales vivas máximas que considera la contribución tanto de las cargas sostenidas como de las cargas extraordinarias máximas. El modelo se sistematiza mediante un **programa de cómputo** que utiliza el método de simulación de **Monte Carlo**.

Utilizando el programa de cómputo mencionado antes, se obtienen **cargas de diseño con probabilidades de excedencia iguales 50%** para los siguientes cuatro destinos de piso: oficinas, aulas, departamentos multifamiliares y cuartos de hotel. La probabilidad de excedencia de 50% se refiere a que la probabilidad de que la carga máxima que ocurre durante la vida útil de la estructura (máximo valor de la suma de carga sostenida más la extraordinaria máxima) exceda el valor de diseño sea de 50%. Este porcentaje se elige debido a que es el valor de probabilidad de excedencia que se utilizó para obtener los factores de carga (1.3 para carga muerta y 1.5 para carga viva) que se recomendarán en la próxima versión de las Normas Técnicas Complementarias para Criterios y Acciones para Diseño Estructural de las Edificaciones (Bojórquez Mora y Ruiz Gómez, 2014)). Se elige estudiar oficinas, aulas, departamentos multifamiliares y cuartos de hotel debido a que se cuenta con datos de levantamientos de cargas sostenidas hechos en este tipo de edificaciones ubicadas en la ciudad de México. Los levantamientos se hicieron en estudios previos realizados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. La metodología que se siguió para el análisis y el total de área analizada para cada caso se mencionaron en la sección 1.1.

- 2) Con base en los valores de cargas de diseño correspondientes a una probabilidad de excedencia de 50%, se estiman los valores de c_a y c_b que intervienen en la ec. 1.3 **para cada uno** de los cuatro destinos de piso en estudio.
- 3) Se comparan los valores de las cargas de diseño (en función del área) obtenidas *a)* con la expresión propuesta en el inciso 3, *b)* con las que se especifican en las NTC-2004, y *c)* con las que recomienda el documento norteamericano ASCE/SEI 7-10.
- 4) Para cada uno de los cuatro destinos de piso en estudio, se calculan las probabilidades de excedencia de las cargas de diseño con la expresión obtenida en el inciso 3, y las correspondientes a las cargas especificadas en las NTC-2004. Las probabilidades de excedencia que resultan no son exactamente de 50% debido al ajuste que se hace en el inciso 3, el que se plantea como un ajuste de mínimos cuadrados de las diferencias entre las probabilidades de excedencia resultantes y el valor objetivo de 50%.
- 5) Con base en los resultados de los cuatro destinos de piso, se analiza que las leyes de reducción de cargas correspondientes a *a)* oficinas y aulas, y por otra parte las correspondientes a *b)* departamentos multifamiliares y cuartos de hotel, resultan muy parecidas, por lo que se decide proponer sólo dos leyes de reducción de cargas máximas, en vez de las cuatro mencionadas en el inciso 3.
- 6) Se calculan las probabilidades de excedencia asociadas a las *dos* expresiones propuestas en el inciso anterior, y se comparan con las probabilidades de excedencia implícitas en las ecuaciones que se recomiendan en la tabla 6.1 de las NTC-2004, así como con las que especifica el documento ASCE/SEI 7-10.

2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y PROCESO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA

2.1 Cargas vivas

La seguridad y economía de las construcciones requiere un conocimiento de las cargas a las que se espera estarán expuestas las estructura durante su vida útil. Si bien la magnitud y duración de las cargas no se puede saber con exactitud, es posible formular modelos probabilistas que reflejen la naturaleza estocástica de estas cargas.

La variación de las cargas vivas con el tiempo en un área dada de piso, durante el periodo de vida útil de un edificio, puede representarse mediante modelos matemáticos que tomen en cuenta el proceso estocástico de los eventos de cargas vivas.

En este estudio se emplean modelos probabilistas previamente desarrollados (Soriano Martínez y Ruiz Gómez, 2001) de cargas vivas en edificios que incluyen el análisis de cargas sostenidas (asociada normalmente con el uso proyectado del espacio) y cargas extraordinarias que representan eventos inusuales de sobrecarga (fiestas o eventos en donde concurre un gran número de personas).

2.1.1 Carga sostenida

La carga sostenida u , es la carga que se conoce como carga viva de servicio de un edificio y se expresa en unidades de carga por unidad de área. Pier y Cornell (1973) encontraron que la magnitud de la carga puede representarse por una función de distribución de probabilidad (fdp) Gamma.

Los modelos de cargas vivas consideran que la intensidad de las cargas que se presentan en los edificios actúa en un área de piso en forma aleatoria. Para Ellingwood y Culver (1997) el valor esperado $E(u)$ es independiente del área de piso A , mientras que la varianza $Var(u)$ se considera una cantidad constante (que es el límite al que tiende la varianza cuando el área tiende a infinito) más una cantidad que es inversamente proporcional al área (A). Esto se representa como:

$$E(u) = m_u \quad (2.1)$$

$$Var(u) = \sigma_a^2 + \frac{K_s}{A} \quad (2.2)$$

Los valores de m_u , σ_a^2 y K_s se determinan a partir de un levantamiento de las cargas vivas de servicio que se encuentran presentes en el instante en el que se llega hacer el muestreo, por lo que a la carga sostenida se le llama también "carga sostenida instantánea"; m_u representa el valor medio de la carga sostenida instantánea; σ_a^2 la varianza de la carga sostenida instantánea para áreas muy grandes; K_s es una constante experimental que representa la pendiente de la varianza en función del inverso del área (Ellingwood y Culver, 1977; Soriano y Ruiz, 2001). Se hace notar que las unidades de K_s no son iguales a las de la varianza, ya que se trata la pendiente de la varianza (ver ecuación 2.2).

La carga sostenida instantánea no está uniformemente distribuida sobre un área de piso, por lo que los efectos de carga en un miembro de una estructura pueden tener una amplia variación con respecto a las obtenidas si se supone una carga uniforme. Este efecto depende de la superficie de influencia. La no uniformidad antes mencionada se toma en cuenta a través de un factor de corrección (k), por lo que la carga sostenida instantánea equivalente a una carga uniformemente distribuida L está dada por las siguientes expresiones:

$$E(L) = m_u = m_L \quad (2.3)$$

$$Var(L) = \sigma_a^2 + \frac{k K_s}{A} \quad (2.4)$$

donde

k está en función de una superficie particular de influencia. Al usar una aproximación polinomial para las superficies de influencia Ellinwood y Culver (1977) sugieren que un valor de k igual a 2.2, que corresponde a los efectos de carga en una columna, es suficientemente preciso para el diseño, por lo que en el presente estudio se utiliza $k=2.2$ para realizar el análisis.

Por otro lado, el modelo que se sigue en este estudio supone que los cambios de ocupación (o cambios de carga sostenida) siguen un proceso de Poisson, como se ilustra en la Fig 2.1, por lo que el tiempo de espera entre dichos cambios tiene una fdp exponencial.

intensidad de la carga sostenida

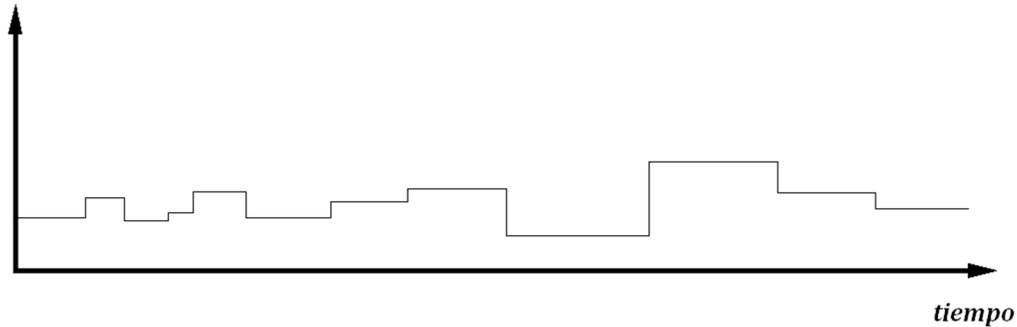


Fig 2.1 Modelo de carga sostenida instantánea

2.1.2 Carga extraordinaria

El modelo en el tiempo de ocurrencia de cargas extraordinarias también se puede representar mediante un proceso de Poisson. En la Fig 2.2 se ilustra el modelo de cargas vivas extraordinarias. Durante cada evento se supone que la gente se reúne en grupos. La ocurrencia de cada uno está representada mediante un proceso de Poisson con media ($\bar{\lambda}$) que depende del área.

La esperanza (expresada en unidades de carga por unidad de área) y la varianza de un evento simple extraordinario E , están dadas por (McGuire y Cornell, 1974):

$$E(E) = \frac{\bar{\lambda} m_W m_R}{A} \quad (2.5)$$

$$Var(E) = \frac{\bar{\lambda} k (m_R \sigma_W^2 + m_W^2 \sigma_R^2 + m_W^2 m_R^2)}{A^2} \quad (2.6)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{(A-155)}{6.3}} \quad (2.7)$$

donde

k convierte la carga a un valor equivalente uniformemente distribuido

A es el área tributaria

m y σ se refieren, respectivamente, a la media y la desviación estándar, mientras que los subíndices

W y R se refieren al peso de una sola persona y al número de personas en un grupo

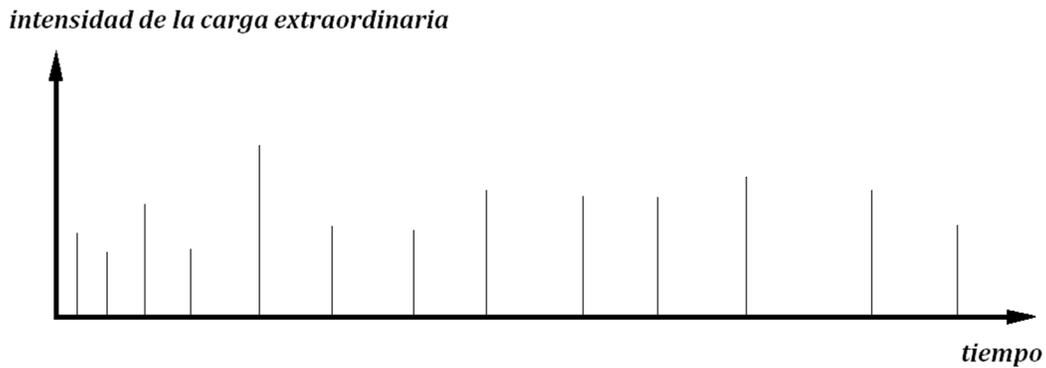


Fig 2.2 Modelo de carga extraordinaria

Carga extraordinaria máxima

La magnitud de la carga extraordinaria puede representarse por una función de distribución tipo Gamma; por otro lado, la magnitud de la carga máxima (ya sea sostenida o extraordinaria) puede representarse por una función de distribución Extrema Tipo I (Peir y Cornell, 1973) cuya función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f_Y(y) = \alpha e^{-\alpha(y-u)} - e^{-\alpha(y-u)} \quad (2.8)$$

y su correspondiente función de distribución acumulada es igual a:

$$F_Y(y) = e^{-e^{-\alpha(y-u)}} \quad (2.9)$$

Los parámetros α y u de la función Extrema Tipo I están dados, a partir de la media (μ) y la desviación estándar (σ) de los datos observados, por las siguientes expresiones (Benjamin y Cornell, 1970):

$$\alpha = \frac{1.282}{\sigma} \quad (2.10)$$

$$u = \mu - \frac{0.577}{\alpha} \quad (2.11)$$

Wen (1977, 1979) desarrolló expresiones matemáticas para obtener de manera aproximada la media y la desviación estándar del máximo de N repeticiones independientes con distribución de variables aleatorias Gamma. Dichas expresiones se utilizan en este estudio para obtener la media de la carga extraordinaria máxima. La expresión para el valor medio es como sigue:

$$\mu_{x_m} = \mu_x + p\sigma_x \quad (2.12)$$

$$p = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln N + 0.5772 \frac{1 + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln N \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)}{2 \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right) + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln N} \quad (2.13)$$

donde

μ_x representa la media

σ_x la desviación estándar de la intensidad de la carga de un evento simple extraordinario (en este estudio corresponden a las ecs 2.5 y 2.6), expresadas en unidades de carga por unidad de área

La desviación estándar σ_{x_m} del máximo de las repeticiones está dada por:

$$\sigma_{x_m} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \sigma_x C_2 \quad (2.14)$$

donde

$$C_2 = \frac{1 + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln N \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)}{2 \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right) + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln N} \quad (2.15)$$

El empleo de las ecs 2.12 a la 2.15 da lugar a resultados conservadores del orden de 10% por arriba de los valores reales calculados por la teoría de probabilidades. Posteriormente en 1979, Wen propuso la siguiente ecuación que sustituye a la ec 2.13:

$$p = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln N \left(1 + 0.1 \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right) \right)^3 \quad (2.16)$$

Wen (1979) mostró que con la ec 2.16 se obtienen resultados tan aproximados que sólo difieren en 1% a los resultados exactos. Estas expresiones (2.12, 2.14, 2.15 y 2.16) se emplearán en el proceso de simulación que se describe en la sección 2.2 de este estudio.

2.1.3 Carga total máxima

La carga viva total máxima que ocurre durante el tiempo de vida útil de la estructura se puede obtener a partir de la combinación de algunos de los siguientes tres casos (Chalk y Corotis, 1980):

- La suma de la carga sostenida máxima más la carga extraordinaria instantánea, ocurriendo ambas en el mismo instante durante la vida útil de la estructura.
- La carga extraordinaria máxima que se presenta en la vida útil de la estructura, más la carga sostenida instantánea que actúa en el mismo tiempo que la carga extraordinaria.

- La suma de la carga sostenida máxima más la mayor carga extraordinaria. Este caso es menos probable que ocurra.

En el presente trabajo se utiliza el modelo en el cual se presenta la carga extraordinaria máxima en un tiempo dado dentro del periodo de vida útil de la estructura, más la carga sostenida que actúa en el mismo instante que la carga extraordinaria máxima, es decir:

$$L_{e_{max}} + L \quad (2.17)$$

donde

$L_{e_{max}}$ representa la carga extraordinaria máxima

L la carga sostenida instantánea que se presenta al mismo tiempo que $L_{e_{max}}$ (ver figura 2.3).

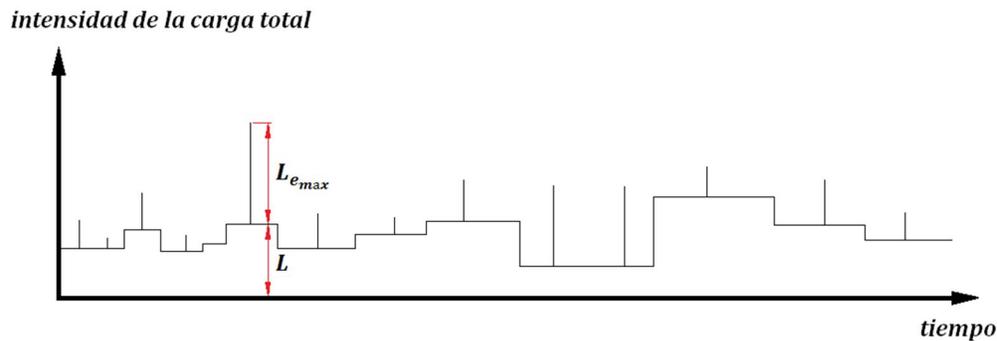


Fig 2.3 Modelo de carga viva total que se utiliza en el presente estudio

2.2 Proceso de simulación numérica usando el método de Monte Carlo

En esta sección se describe el proceso de simulación empleado para estimar la carga viva máxima de diseño considerando el efecto de la carga sostenida instantánea y la extraordinaria máxima mediante el método de Monte Carlo (Rubinstein, 1981; Sobol, 1983).

Antes de iniciar el proceso de simulación se definen algunos parámetros como son el periodo de vida útil de la estructura (T_R), el índice de cambios de carga sostenida (ν_S), y la frecuencia con que se presentan eventos extraordinarios (ν_E) en edificios con cierto destino.

Adicionalmente, como datos de entrada al programa de cómputo se requiere la media y la varianza de las cargas sostenidas instantáneas (ecs 2.3 y 2.4) que se estiman a partir de un estudio estadístico de cargas vivas asociadas al uso u ocupación de edificios en un grupo dado.

El proceso de simulación se realiza para un número de áreas A definidas por el usuario (una cantidad adecuada para definir el comportamiento de la carga de diseño). Además, se debe proponer un valor de la probabilidad de excedencia P_E de las cargas de diseño. A continuación se resume el proceso de simulación (ver diagrama de bloques de la Fig 2.7) elaborado dentro de un programa de cómputo en Matlab:

1. Generación de intervalos de tiempo entre cambios de carga sostenida

Los intervalos de tiempo t_i entre cambios de carga sostenida se generan usando una función de distribución exponencial, dado un índice de cambios de ocupación vs.

En el programa de cómputo elaborado como parte de esta investigación se utilizó la función $\text{exprnd}(\mu, m, n)$ de Matlab para generar un vector de tiempos entre los cambios de carga sostenida t_a , con números aleatorios con distribución exponencial. A partir del vector de tiempos entre cambios de carga t_a se define el vector de intervalos de tiempo entre carga sostenida t , tomando en cuenta que la suma de los valores de este último vector debe ser mayor al periodo de vida útil de la estructura T_R . Esto implica que todos los valores simulados de t_i que corresponden a instantes posteriores a T_R no se toman en cuenta. En la función $\text{exprnd}(\mu, m, n)$, el parámetro μ representa la media de los tiempos entre cambios de ocupación, m y n definen el tamaño de la matriz de números aleatorios, respectivamente. En este modelo en particular m será uno y n el número de simulaciones. Más adelante se define el número de simulaciones que se usaron en este estudio.

En la figura 2.4 se observa que el vector de intervalos de tiempo entre cambios de carga sostenida t queda definido con " K " número de coeficientes. Para fines ilustrativos, en esta figura se hizo coincidir la suma de los intervalos simulados (t_1, t_2, \dots, t_k) con el valor de la vida útil de la estructura (T_R); sin embargo, en el proceso de simulación el último cambio generalmente no coincide con T_R .

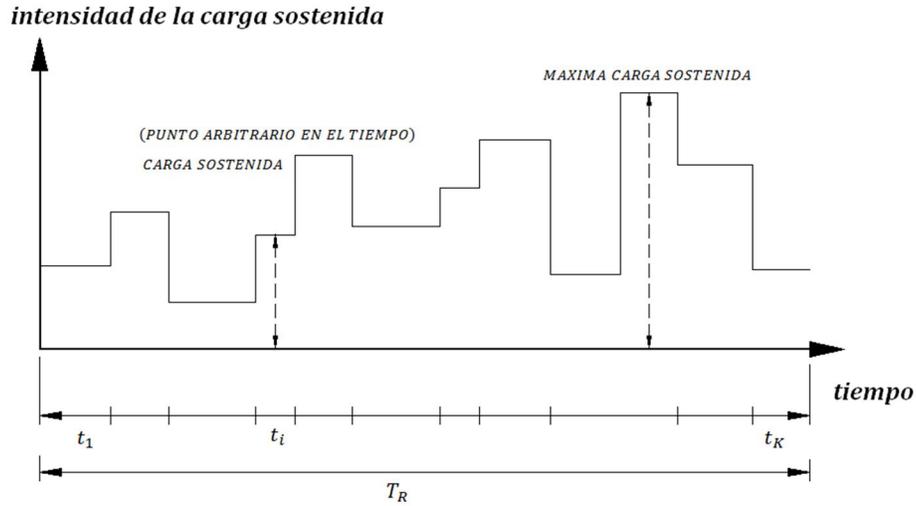


Fig 2.4 Intervalos de tiempo entre cambios de la carga sostenida

2. Generación de la carga sostenida

Se genera la magnitud de la carga sostenida en puntos arbitrarios en el tiempo suponiendo una función de distribución Gamma (ver Fig 2.5). La función de densidad de probabilidad Gamma se define como sigue:

$$f_X(x) = \frac{\lambda(\lambda x)^{k-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(k)} \quad (2.18)$$

donde la media y la desviación estándar correspondientes a esta función están dadas por:

$$\mu = \frac{k}{\lambda} \quad (2.19)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{k}{\lambda^2}} \quad (2.20)$$

En estas ecuaciones se puede deducir que el coeficiente de variación depende únicamente de un sólo término, el factor λ . Además, se puede demostrar que:

$$\lambda = \frac{\mu}{\sigma^2} \quad (2.21)$$

$$k = \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (2.22)$$

μ y σ corresponden a la media y la desviación estándar de las cargas vivas sostenidas, parámetros que se definen de la estadística de las cargas de servicio (ecs 2.3 y 2.4).

En este estudio se empleó la función $gamrnd(A, B, m, n)$ de Matlab para generar los valores aleatorios de la magnitud de la carga sostenida. El valor A es igual al factor de forma k , y B se define con el parámetro de escala λ de la función de distribución Gamma. Los valores de m y n definen las dimensiones de la matriz de números aleatorios.

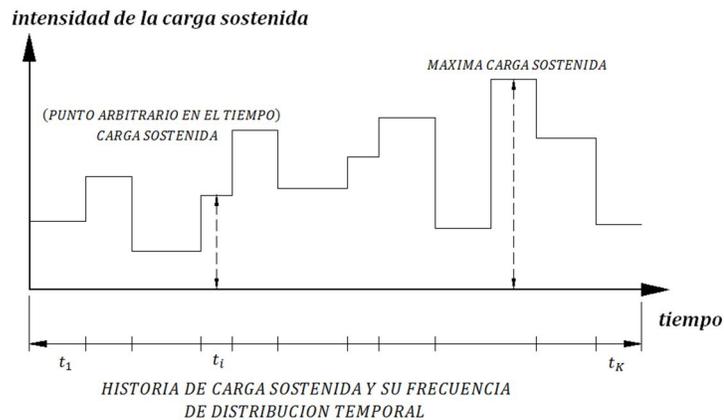


Fig 2.5 Distribución de la intensidad de carga sostenida

3. Generación de la máxima carga extraordinaria

La máxima carga extraordinaria que ocurre durante cada intervalo de duración de la carga sostenida puede generarse directamente a partir de una función de distribución Extrema Tipo I, usando las ecuaciones propuestas por Wen (1979). Las ecuaciones 2.12 y 2.14 permiten conocer la media y la dispersión de la intensidad de carga del máximo de N repeticiones independientes, con distribución de variables aleatorias Gamma. En estas ecuaciones el valor de N es igual a:

$$N = v_E t_i \tag{2.23}$$

donde

v_E se define como la tasa media de ocurrencia de eventos que generan la sobrecarga

t_i representa el i -ésimo intervalo de ocurrencia de la carga extraordinaria durante el tiempo de vida útil del edificio (estos intervalos de tiempo presentan una fdp exponencial)

v_E es una constante de diseño (Chalk y Corotis, 1980; Harris, Corotis y Bova, 1981)

La ec 2.23 supone que N es un valor determinístico, dado el valor de t_i , aunque esto no es rigurosamente cierto puede considerarse como una aproximación razonable.

Conocidas la media y la desviación de la carga máxima, es posible determinar los parámetros α y u (ecs 2.10 y 2.11) que definen la máxima carga extraordinaria y como la inversa de la función Extrema Tipo I:

$$y = u - \frac{\ln[-\ln[F_Y(y)]]}{\alpha} \quad (2.24)$$

Generación de números aleatorios

Para generar números aleatorios a partir de una función de distribución acumulada se emplea el método de transformación inversa (Rubinstein, 1981). El método considera que y es una variable de una función de distribución de probabilidad acumulada $F_Y(y)$. Debido a que $F_Y(y)$ es una función no decreciente, la función inversa $F_Y^{-1}(U)$ puede definirse considerando una variable U con valores dados con una función de distribución uniforme sobre el intervalo (0,1), tal que (ver Fig 2.6):

$$Y = F_Y^{-1}(U) \quad (2.25)$$

Esto es:

$$P(Y \leq y) = P[F_Y^{-1}(U) \leq y] = P[U \leq F_Y(y)] = F_Y(y) \quad (2.26)$$

Así, para obtener un valor y de una variable aleatoria Y , se obtiene un valor u de una variable aleatoria U ; se calcula $F_Y^{-1}(U)$, y se iguala a y .

En el programa realizado como parte de este estudio se utilizó la función *unifrnd*(A_1 , B , m , 1) de Matlab para generar los números aleatorios con fdp uniforme, donde el valor A_1 y B son los límites de la función, en este caso 0 y 1; y el valor de m define el tamaño del vector de números aleatorios.

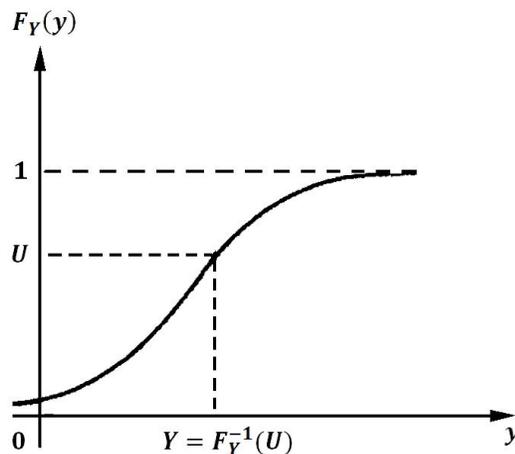


Fig 2.6 Método de transformación inversa

4. Combinación de las cargas vivas

La combinación de carga viva total máxima (ec 2.17) se encuentra entre los intervalos de tiempo (ver Fig 2.5) que se presentan durante la vida útil de la estructura (T_R). Se selecciona la combinación más desfavorable y se almacenan los resultados. Esto se indica en el diagrama de bloques de la Fig 2.7.

En el diagrama de la Fig 2.7b, CL representa la máxima combinación de carga y $SUPCL$ es un vector que almacena los valores máximos del resultado en cada simulación.

5. Proceso de simulación

De acuerdo con el diagrama de la Fig 2.7 el procedimiento descrito de los puntos A al E se repite para un número de veces definido por el usuario. En este caso se consideró que el proceso con 1000 simulaciones genera resultados aceptables, ya que si se incrementa el número de simulaciones se obtienen resultados similares a los obtenidos con 1000 simulaciones.

6. Resultados de la aplicación

Al término del proceso de simulación se obtienen los valores de la media (UCL) y la varianza (VCL) del vector de resultados de la carga viva total máxima ($SUPCL$).

Finalmente se repite el proceso en función de las áreas tributarias consideradas. En esta investigación se consideraron áreas entre 18.59 y 260.26 m².

En el programa realizado como parte de este estudio, los resultados del proceso de simulación se almacenan en la variable $RESP$, que se muestra al final del diagrama de la Fig 2.7b, y se imprimen en un archivo de texto con los resultados de la media y la varianza de la carga total para cada área de estudio.

7. Probabilidades de excedencia

La carga total se deberá corregir suponiendo una probabilidad de excedencia constante para todas las áreas en estudio, lo que conduce a usar las ecuaciones descritas en la sección 2.3 (ver la sección 2.3 y el diagrama de flujo de la Fig 2.8).

Dada una carga de diseño con una probabilidad de excedencia para cada área tributaria, y tomando en cuenta la tendencia de dichos valores, los resultados pueden ajustarse para definir una expresión matemática sobre el comportamiento de la carga de diseño.

Las Figs 2.7a y 2.7b muestran de manera esquemática el proceso de simulación de las cargas sostenida y extraordinaria máxima que se llevó a cabo para generar

la distribución de probabilidades de los valores máximos de la carga de diseño durante un lapso dado. En la Tabla 2.1 se muestra la simbología que se emplea en las Figs 2.7a y b.

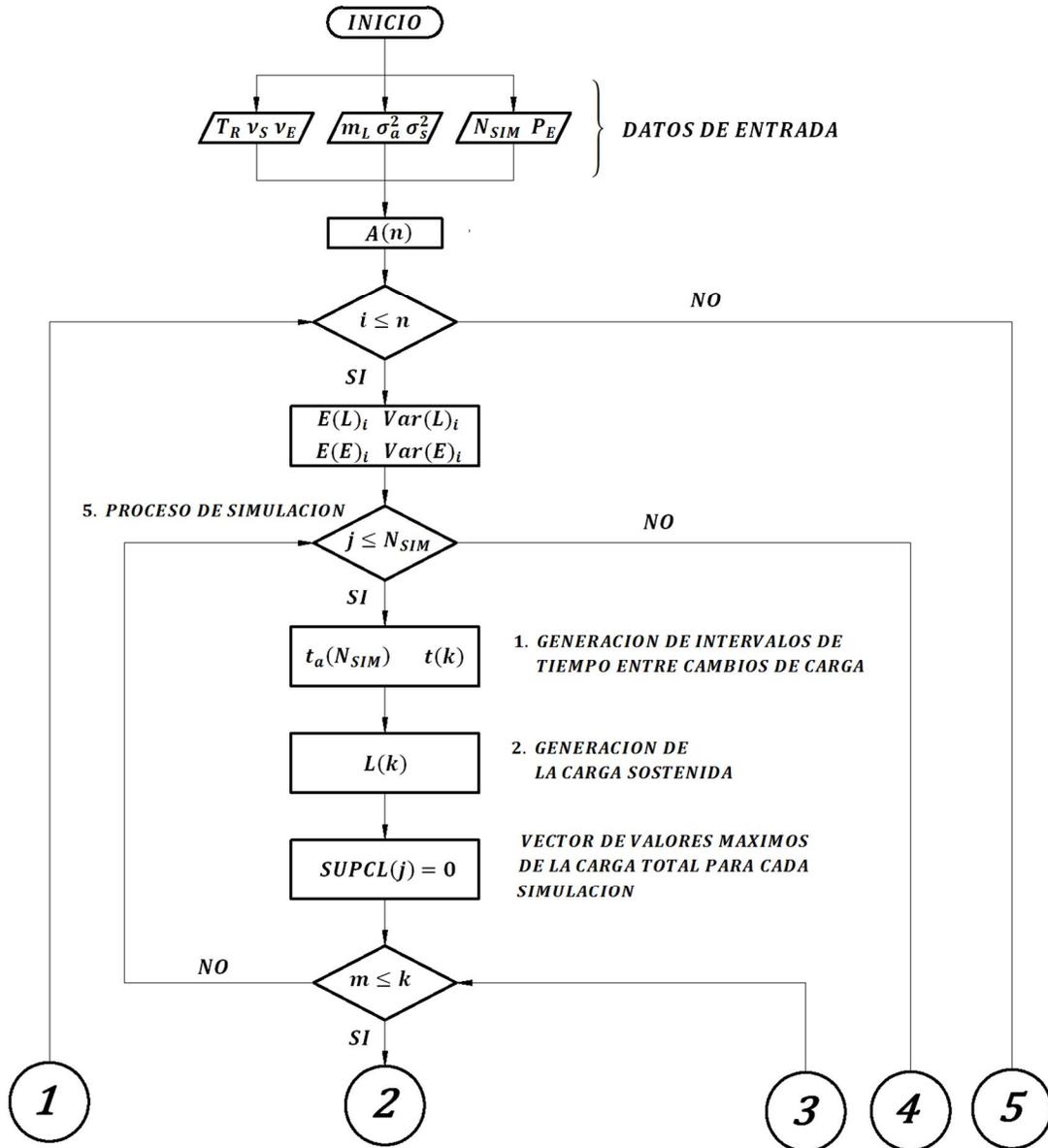


Fig 2.7 a)

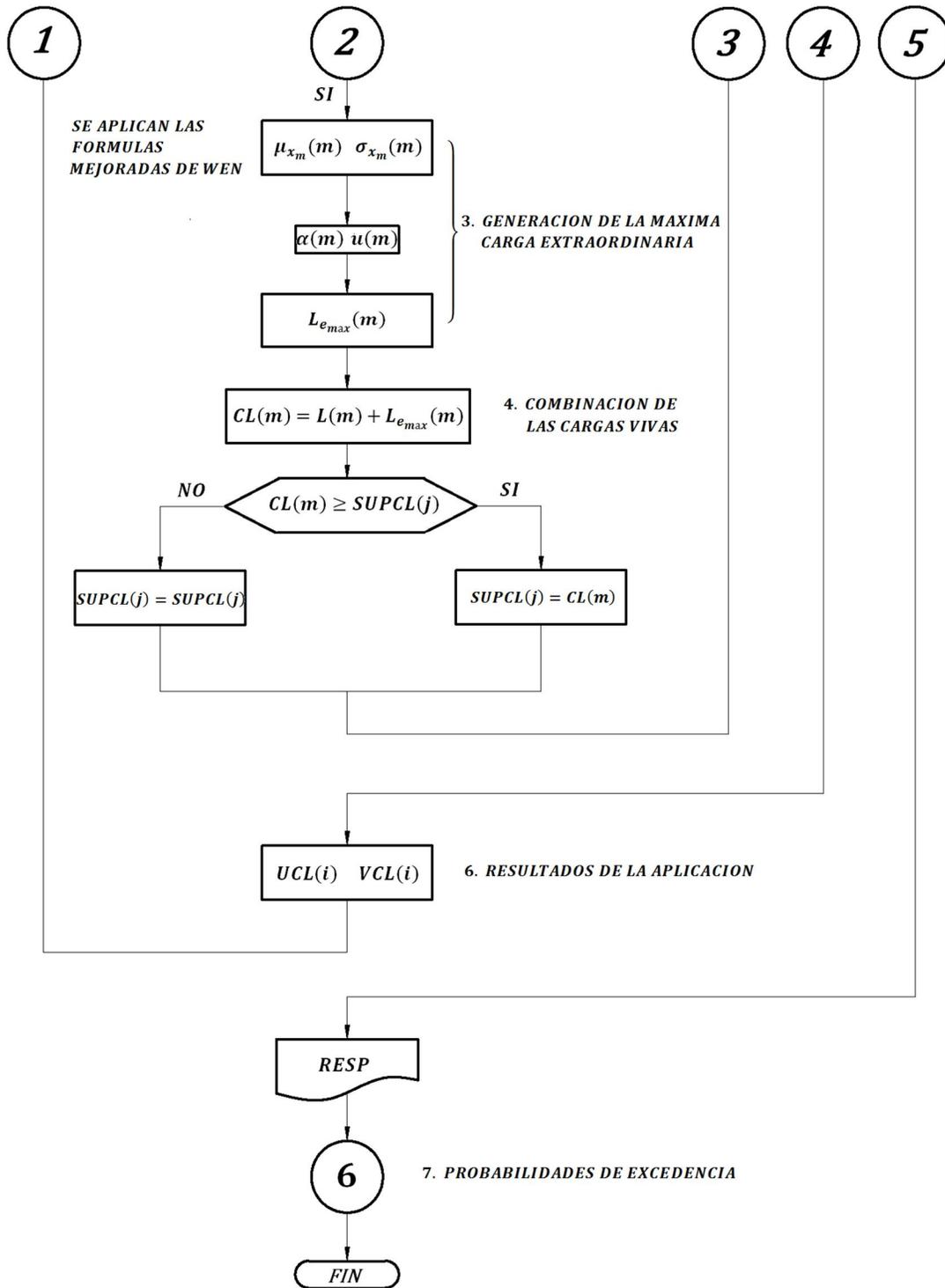


Fig 2.7 b)

Fig 2.7 Diagrama de bloques para encontrar las cargas vivas de diseño

Tabla 2.1 Simbología utilizada en los diagramas de bloque de las Figs 2.7 y 2.8

T_R	Periodo de vida útil de la edificación
v_S	Índice de cambios de ocupación de cargas sostenidas
v_E	Índice de cambios de ocupación de cargas extraordinarias
m_L	Media de las cargas sostenidas instantáneas
σ_a^2	Varianza de las cargas sostenidas instantáneas
K_s	Constante experimental resultado de un ajuste de los datos de las cargas
N_{SIM}	Número de simulaciones
P_E	Probabilidad de excedencia
A	Área tributaria
i	Número de áreas tributarias
$E(L)$	Media de las cargas sostenidas instantáneas (ec 2.3)
$Var(L)$	Varianza de las cargas sostenidas instantáneas (ec 2.4)
$E(E)$	Media de las cargas extraordinarias (ec 2.5)
$Var(E)$	Varianza de las cargas extraordinarias (ec 2.6)
j	Contador de simulaciones
t_a	Vector de tiempos con distribución exponencial y de tamaño N_{SIM}
t	Vector de tiempos con distribución exponencial, y K elementos
K	Elementos del vector de tiempos, cuya suma es igual a T_R
L	Vector de cargas sostenidas con distribución Gamma, y K elementos
$SUPCL$	Vector de valores máximos de la carga total para cada simulación
m	Contador de elementos para el vector de cargas extraordinarias
μ_{x_m}	Media obtenida de las fórmulas de Wen (ec 2.12)
σ_{x_m}	Desviación obtenida de las fórmulas de Wen (ec 2.14)
α y u	Parámetros de la función acumulada Extrema Tipo I (ecs. 2.10 y 2.11)
$L_{e_{max}}$	Carga extraordinaria máxima
CL	Carga total
UCL y VCL	Valores medios de la media y la varianza de la carga total
$RESP$	Matriz de resultados de cargas del proceso de simulación
W_m	Carga viva máxima con probabilidades de excedencia uniforme
PE	Matriz de resultados de carga con probabilidades de excedencia constante

2.3 Probabilidades de excedencia

La probabilidad de excedencia se define como la probabilidad de que un valor dado sea superado en un lapso. La probabilidad de excedencia de un valor cualquiera, y , está dada por:

$$P^* = p[y > y_0] = 1 - F_Y(y_0) \quad (2.27)$$

donde

$F_Y(y)$ es una función de distribución acumulada que representa un evento cualquiera. Para este estudio se trata de una función Extrema Tipo I que representa a la carga total máxima, por lo que:

$$F_Y(y) = e^{-e^{-\alpha(y-u)}}$$

En sentido inverso, es posible establecer la magnitud de un evento cualquiera asociado a una probabilidad de excedencia específica P^* , para ello basta con despejar la variable y de la expresión 2.27, como sigue:

$$y = u - \frac{\ln[-\ln[1-P^*]]}{\alpha} \quad (2.28)$$

Conocidos los parámetros α y u se pueden calcular las probabilidades de excedencia asociadas a ciertas cargas (ec 2.27) o bien los valores de las cargas vivas asociadas a una probabilidad de excedencia específica (ec 2.28).

Dentro del proceso de simulación descrito anteriormente se obtienen los valores de la media de la carga viva total con una probabilidad de excedencia variable según el área en cuestión. Al finalizar el proceso de simulación, con los resultados de la carga máxima total se obtienen los parámetros α y u correspondientes a cada área de estudio con las ecs 2.10 y 2.11, y dada una probabilidad de excedencia constante, P_E , los valores medios de la carga total se corrigen W_m , y se almacenan en un archivo de resultados (PE). Este proceso se ilustra en el diagrama de flujo de la Fig 2.8.

**PROCESO DE GENERACION DE CARGAS
ASOCIADAS A UNA PROBABILIDAD DE
EXCEDENCIA ESPECIFICA**

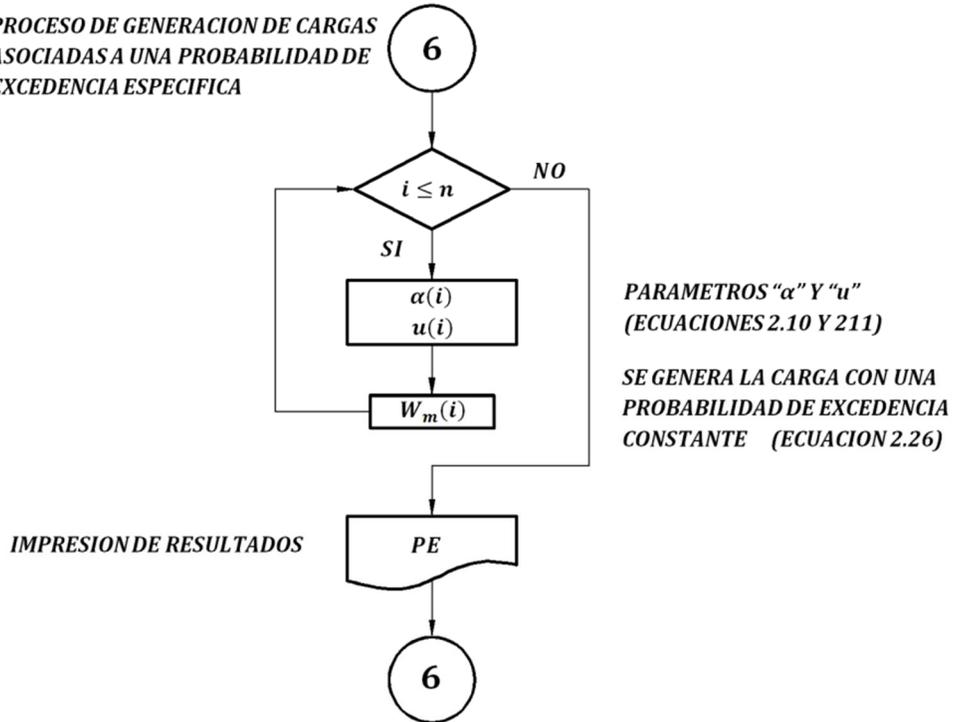


Fig 2.8 Diagrama de flujo para obtener cargas de diseño con probabilidad de excedencia constante

Para llevar a cabo el proceso de simulación y obtener las cargas de diseño con probabilidades de excedencia constantes con el área, se elaboró un programa en Matlab de acuerdo con lo descrito en las secciones 2.2 y 2.3. Para cada caso se realizó un número de simulaciones $N_{sim} = 1000$. Este valor se eligió debido a que si se utilizaba un número mayor, los resultados no cambiaban significativamente. El tiempo de proceso numérico del programa de cómputo para cada tipo de edificación (usando $N_{sim}=1000$) fue de 3.7 segundos en una PC con procesador de 2.33GHz.

3 CUATRO PROPUESTAS DE REDUCCIÓN DE VALORES CARGAS VIVAS MÁXIMAS EN FUNCIÓN DEL ÁREA PARA EL DISEÑO DE EDIFICACIONES, CONSIDERANDO UNA PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE APROXIMADAMENTE 50%

En este capítulo se obtienen los resultados que se presentan en los incisos 1 a 6 correspondientes a edificios con los siguientes destinos de piso: *a)* oficinas, *b)* aulas, *c)* departamentos habitación multifamiliares, y *d)* cuartos de hotel.

- 1) Primeramente se presentan los valores básicos con los que se alimenta el programa de cómputo (los valores básicos se encontraron previamente en estudios realizados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM).
- 2) Se obtiene el valor medio y la varianza de las cargas máximas totales correspondientes a diferentes áreas tributarias, y se analiza cuál es la participación tanto de las cargas sostenidas máximas como de las extraordinarias máximas en función del área.
- 3) Se encuentra cuál debe ser el valor de la carga máxima de diseño para que su probabilidad de excedencia sea igual a 50%.
- 4) Mediante un ajuste, se obtienen los parámetros c_a y c_b que intervienen en la ec 1.3.
- 5) Se compara la expresión encontrada en el inciso anterior con la propuesta por las NTC-2004 y con la especificada por el ASCE/SEI 7-10.
- 6) Se calculan las probabilidades de excedencia usando los parámetros obtenidos en el inciso 4 y, alternativamente, usando las expresiones recomendadas por las NTC-2004.

Posteriormente, en el capítulo 4, se analiza que las cuatro expresiones correspondientes a oficinas, aulas, departamentos y cuartos de hotel se pueden reducir a dos expresiones, que son las que se proponen para la futura versión de las Normas Técnicas Complementarias para Criterios y Acciones para Diseño Estructural de las Edificaciones.

3.1 Análisis de cargas vivas en oficinas

Con base en el estudio estadístico sobre cargas sostenidas instantáneas realizado por Soriano Martínez y Ruiz Gómez (2001) para el caso de oficinas, la media de las cargas y la varianza en función del área (A) están dadas por:

$$m_u = 75.1 \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (3.1)$$

$$\text{Var}(u) = \frac{4647.74}{A} + 409.29 \text{ [kg/m}^2\text{]}^2 \quad (3.2)$$

Los datos de entrada requeridos por el programa de cómputo para el proceso de simulación numérica se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Parámetros de entrada al programa de cómputo para la simulación de cargas en oficinas

T_R [años]	ν_s [1/año]	ν_{EX} [1/año]	m_u [kg/m ²]	σ_a [kg/m ²] ²	K_s [kg/m] ²
50	0.125	1.00	75.1	409.29	4647.74

En la Tabla 3.1 T_R representa el periodo de vida útil del edificio que en este caso es de 50 años, ν_s es el índice de cambios de la carga sostenida (el inverso de este valor indica cada cuántos años en promedio ocurre un cambio de ocupación, que en este caso se supuso igual a 8 años), y ν_{EX} indica la tasa de ocurrencia de eventos de la carga extraordinaria (el inverso de este valor indica cuántas veces al año en promedio se realizan eventos que conducen a cargas vivas elevadas, que en este caso es uno cada año). El valor de ν_{EX} fue propuesto por los autores con base en su experiencia, tomando también en cuenta las opiniones de quienes laboran en las oficinas que se visitaron. Los valores de T_R , ν_s y ν_{EX} que se muestran en la Tabla 3.1 son congruentes con la práctica en México y coinciden con los que se supusieron para obtener las cargas máximas de diseño que recomienda el ASCE/SEI 7-10.

Los valores de los parámetros m_u , σ_a^2 y σ_s^2 (ver ecs 2.3 y 2.4) que se muestran en la Tabla 3.1 resultan del análisis estadístico de las cargas sostenidas existentes en varios edificio (Soriano et al, 2001) que para el caso de oficinas están dadas por las ecs 3.1 y 3.2.

A partir de la aplicación del programa de cómputo, para 1000 simulaciones, correspondientes a doce áreas tributarias, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Datos de entrada y resultados obtenidos con el programa de cómputo

Área (A)[m ²]	m_u [kg/m ²]	σ_u [kg/m ²]	m_{EX} [kg/m ²]	σ_{EX} [kg/m ²]	$E[EX]$ [kg/m ²]	$VAR[EX]$ [kg/m ²] ²	$E[LS]$ [kg/m ²]	$VAR[LS]$ [kg/m ²] ²	$E[T]$ [kg/m ²]	$VAR[T]$ [kg/m ²] ²
18.59	75.10	30.97	39.16	39.83	153.05	2175.44	97.85	1203.58	250.90	1872.83
36.00	75.10	26.33	45.95	31.01	127.39	1142.42	95.65	876.11	223.03	1049.38
37.18	75.10	26.16	45.69	30.42	126.41	1273.21	97.93	878.77	224.34	1093.17
55.77	75.10	24.34	41.05	23.55	101.58	741.05	98.07	736.66	199.65	784.46
74.36	75.10	23.38	37.07	19.38	85.26	603.55	98.91	636.53	184.18	634.53
92.95	75.10	22.79	33.94	16.58	73.59	487.26	100.99	603.87	174.57	567.11
111.54	75.10	22.38	31.45	14.57	66.64	370.46	100.16	530.39	166.80	496.12
130.13	75.10	22.09	29.43	13.05	58.97	285.49	100.36	479.52	159.34	389.52
148.72	75.10	21.86	27.74	11.85	54.27	276.04	101.73	503.30	156.00	456.79
185.90	75.10	21.55	25.08	10.08	47.35	242.19	101.95	444.00	149.30	421.57
223.08	75.10	21.33	23.05	8.82	41.84	175.87	102.33	405.25	144.17	368.75
260.26	75.10	21.18	21.45	7.88	37.32	140.18	102.94	373.31	140.26	314.13

En la primera columna de la Tabla 3.2 se muestra el área (A) tributaria de interés. La simulación se realizó para los siguientes valores de áreas tributarias: 18.59, 36.00, 37.16, 55.74, 74.32, 92.90, 111.48, 130.06, 148.64, 185.80, 222.96, 260.12 m² que corresponden a 200, 387.5, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 2000, 2400, 2800 ft², respectivamente. Se eligió este intervalo de valores por considerarse de uso común para el tipo de estructuras que aquí se analizan. En la segunda, tercera, cuarta y quinta columnas se presentan los datos de entrada al programa, donde m_u , σ_u , m_{EX} y σ_{EX} representan la media y la desviación estándar de los datos de cargas sostenidas y extraordinarias, respectivamente. Los valores de $E[EX]$, $E[LS]$ y $E[T]$ indican la media de los valores máximos obtenidos del proceso de simulación para las cargas extraordinarias, sostenidas y totales, respectivamente; mientras que $VAR[EX]$, $VAR[LS]$ y $VAR[T]$ representan la varianza de las mismas.

La última columna de la Tabla 3.2 indica que la varianza de la carga total, $VAR[T]$, es grande para áreas pequeñas, y que disminuye a medida que el área tributaria A (que se lista en la primera columna de la Tabla 3.2) aumenta.

Los valores $E[EX]$, $E[LS]$ y $E[T]$ con respecto al área se presentan gráficamente en la Fig 3.1. En ésta se puede apreciar que los valores medios obtenidos de la simulación para la carga sostenida máxima $E[LS]$ se mantienen aproximadamente constantes, mientras que los valores medios de la carga máxima extraordinaria $E[EX]$ disminuyen con el incremento del área. Debido a esto, la esperanza de la carga total $E[T]$ presenta una disminución al aumentar el área.

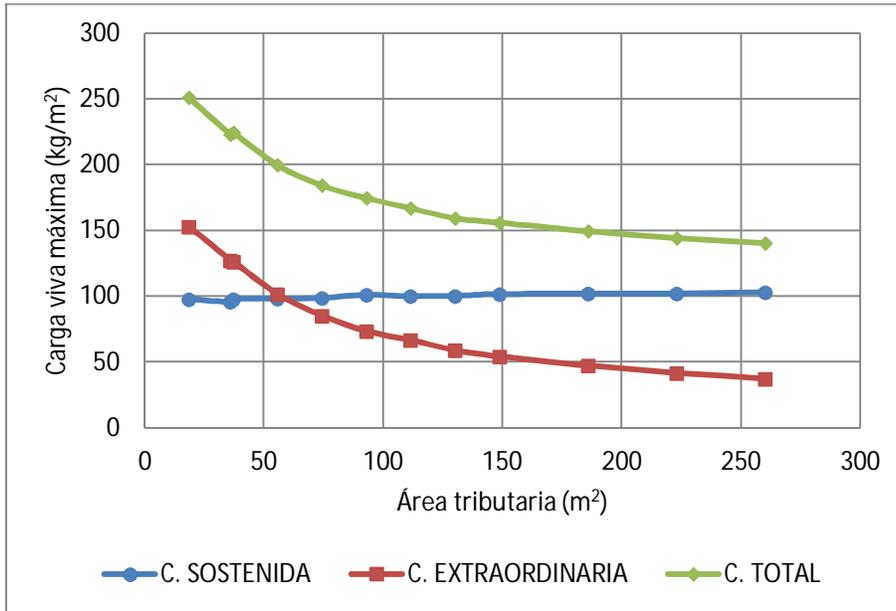


Figura 3.1 Valores medios de cargas máximas sostenida, extraordinaria y total, para oficinas

Los valores de carga viva máxima de diseño (W_m) se presentan en la última columna de la Tabla 3.3. Estos se ajustan a una probabilidad de excedencia $P_{EX} = 50\%$, siguiendo el criterio que se explica en la sección 2.3. Los parámetros α y u que aparecen en la Tabla 3.3 se obtuvieron a partir de las ecs 2.10 y 2.11, respectivamente.

El significado de cada una de las columnas de la Tabla 3.3 se dio anteriormente (ver sección 2.3).

Con base en los resultados de carga viva máxima (W_m) correspondientes a una probabilidad de excedencia de 50% (Tabla 3.3) se ajustan los parámetros de la ec 1.3, dando lugar a la ec 3.3 que corresponde al valor para la carga de diseño de oficinas, tomando en cuenta la reducción como función del área tributaria (A).

$$80 + \frac{925}{\sqrt{A}} \quad ; A > 36\text{m}^2 \tag{3.3}$$

Para $A \leq 36 \text{ m}^2$ la carga de diseño se aproxima a 240 kg/m^2 .

Tabla 3.3 Parámetros para obtener la carga para el diseño de oficinas correspondiente a una probabilidad de excedencia igual a 50%

Área (A) [m ²]	$E[T]$ [kg/m ²]	$VAR[T]$ [kg/m ²] ²	α	u	P_{EX} [%]	W_m [kg/m ²]
18.59	250.90	1872.83	0.03	231.43	50.00	243.80
36.00	223.03	1049.38	0.04	208.46	50.00	217.72
37.18	224.34	1093.17	0.04	209.47	50.00	218.91
55.77	199.65	784.46	0.05	187.05	50.00	195.06
74.36	184.18	634.53	0.05	172.84	50.00	180.04
92.95	174.57	567.11	0.05	163.86	50.00	170.67
111.54	166.80	496.12	0.06	156.77	50.00	163.14
130.13	159.34	389.52	0.06	150.46	50.00	156.10
148.72	156.00	456.79	0.06	146.38	50.00	152.49
185.90	149.30	421.57	0.06	140.07	50.00	145.93
223.08	144.17	368.75	0.07	135.53	50.00	141.02
260.26	140.26	314.13	0.07	132.29	50.00	137.35

La ec 3.3 se compara con los valores recomendados por las NTC-2004 y por el documento ASCE/SEI 7-10 en la Fig 3.2. En ésta se puede ver que los valores obtenidos en el presente estudio son parecidos a los valores de diseño especificados en el documento ASCE/SEI 7-10 (para $K_{LL}=1$), mientras que los correspondientes a las NTC-2004 se encuentran por arriba de los obtenidos en el presente estudio debido a que tienen probabilidades de excedencia menores, lo que se muestra a continuación.

En la Fig 3.3 se presentan las probabilidades de excedencia (PE) de las cargas actuantes con respecto a sus valores nominales correspondientes a la carga para el diseño de oficinas que se especifica en las NTC-2004, y además, a la ec 3.3. Como puede observarse en la Fig 3.3, las PE para las NTC-2004 son del orden de 10% para $A \geq 36 \text{ m}^2$, mientras que las calculadas con la ec 3.3 son cercanas a 50%. Por otro lado, las PE para $A < 36 \text{ m}^2$ resultan cercanas o menores a 50%.

Es decir, el valor de la carga máxima correspondiente a la ec 3.3 da lugar a una probabilidad de excedencia (PE) de las cargas actuantes en oficinas de aproximadamente 50% con respecto a sus valores nominales de diseño, lo que implica que la ec 3.3 cumple con los objetivos de este estudio (ver sección 1.2). Es importante recordar que la PE debe ser cercana a 50% debido a que en el estudio que se realizó para proponer los nuevos factores de carga que se incorporarán a versión actualizada de las NTC-2004 (Bojórquez Mora y Ruiz Gómez, 2014a) se hizo la hipótesis que la PE era igual a 50% (ver sección 1). Por otro lado, la Fig 3.3 muestra que las cargas de diseño especificadas en las NTC-2004 vigentes dan lugar a una aproximadamente a una PE de 10%; sin embargo, no existe algún estudio en México que justifique que para obtener los factores de carga especificados en las NTC-2004 vigentes se haya hecho la hipótesis de que la PE sea igual a 10%.

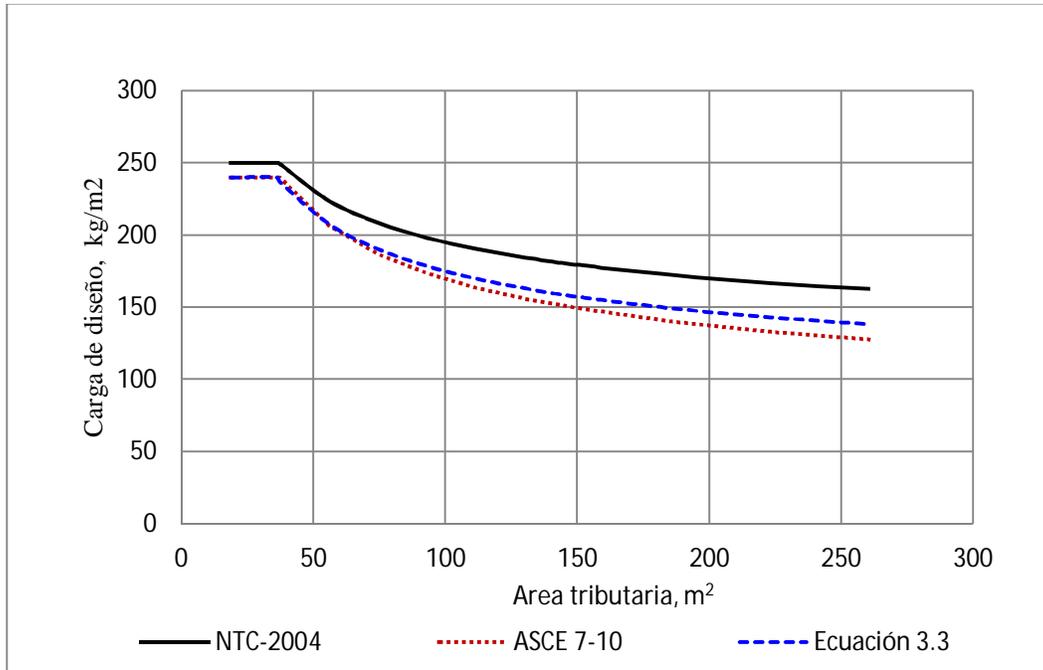


Fig 3.2 Valores de cargas vivas para el diseño de edificios para oficinas

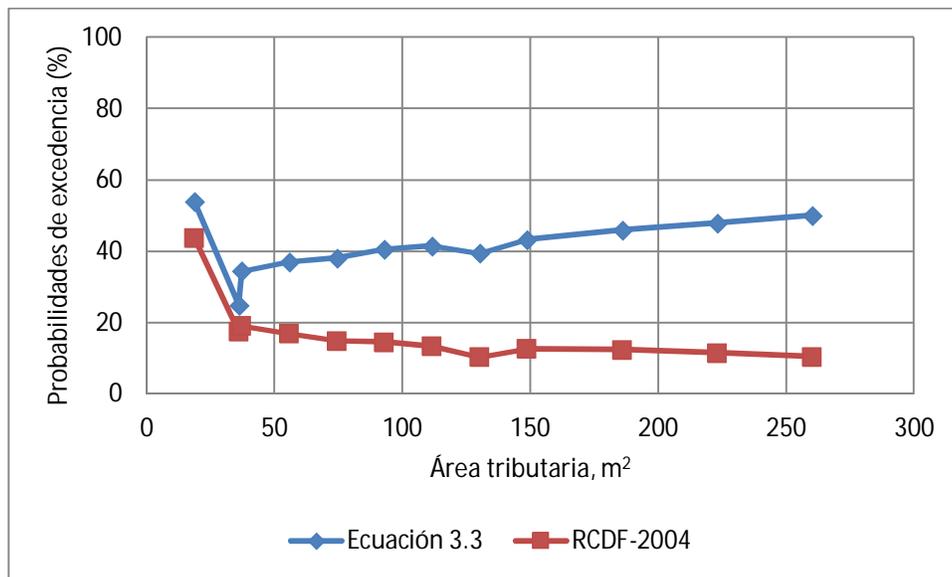


Fig 3.3 Probabilidades de excedencia de las cargas máximas para oficinas

3.2 Análisis de cargas vivas en aulas

A partir del estudio estadístico de las cargas sostenidas instantáneas realizado por Sampayo Trujillo y Ruiz Gómez (2001), la media y la varianza que definen en forma probabilística los valores de las cargas sostenidas en aulas son las siguientes:

$$m_u = 67.855 \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (3.4)$$

$$Var(u) = \frac{2152.679}{A} + 31.657 \text{ [kg/m}^2\text{]}^2 \quad (3.5)$$

Los datos de entrada requeridos para el programa de cómputo se presentan en la Tabla 3.4 (el significado de los parámetros que aparecen en la tabla se dio anteriormente). Nótese que el periodo de vida útil (T_R) de las aulas se considera de 100 años, a diferencia de los otros destinos de uso que se analizan en este trabajo para los que se consideran 50 años. Se considera un periodo de vida útil de 100 años para las aulas debido a que en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2004) las escuelas están catalogadas como estructuras que pertenecen al Grupo A. Este agrupa a edificaciones cuya falla estructural podría constituir un peligro significativo por contener sustancias tóxicas o explosivas, así como edificaciones cuyo funcionamiento es esencial a raíz de una emergencia urbana, como: hospitales, escuelas, terminales de transporte, estaciones de bomberos, centrales eléctricas y de telecomunicaciones, estadios, depósitos de sustancias flamables o tóxicas, museos y edificios que alojen archivos y registros públicos de particular importancia, y otras edificaciones a juicio de la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del Distrito Federal.

En la Tabla 3.4 se puede ver que el cambio de ocupación (v_s) se consideró una vez por año debido a que se supone que cada año en promedio se hacen cambios o modificaciones en el mobiliario, y además, se reciben cada año diferentes grupos de alumnos. Por otro lado, se supuso $v_{EX} = 1.00$ debido a que se supone que una vez al año en promedio hay una fuerte concentración de personas en una aula. Los valores anteriores fueron propuestos por los autores con base en su experiencia, y tomando también en cuenta las opiniones de los docentes que laboran en las escuelas que se visitaron. Los valores de T_R , v_s y v_{EX} que se mencionan en la Tabla 3.4 son congruentes con la práctica en México y coinciden con los que se supusieron para obtener las cargas máximas de diseño que recomienda el ASCE/SEI 7-10.

Tabla 3.4 Parámetros de entrada al programa para la simulación de cargas en aulas

T_R [años]	v_s [1/año]	v_{EX} [1/año]	m_u [kg/m ²]	σ_a [kg/m ²] ²	K_s [kg/m] ²
100	1.00	1.00	67.855	31.657	2152.679

A partir del programa de simulación se obtuvieron los resultados de la Tabla 3.5. La descripción de lo que representa cada columna de la Tabla 3.5 es igual a la de la Tabla 3.2. Los valores $E[EX]$, $E[LS]$ y $E[T]$ que aparecen en las columnas 6, 8 y 10 de la Tabla 3.5, para cada una de las áreas que se presentan en la primera columna, se muestran gráficamente en la Fig 3.4.

Tabla 3.5 Datos de entrada y resultados de la carga máxima total para aulas

Área [m ²]	m_u [kg/m ²]	σ_u [kg/m ²]	m_{EX} [kg/m ²]	σ_{EX} [kg/m ²]	$E[EX]$ [kg/m ²]	$VAR[EX]$ [kg/m ²] ²	$E[LS]$ [kg/m ²]	$VAR[LS]$ [kg/m ²] ²	$E[T]$ [kg/m ²]	$VAR[T]$ [kg/m ²] ²
18.6	67.86	16.92	34.90	35.50	127.92	1145.94	81.85	402.30	209.78	815.59
36.0	67.86	12.78	40.95	27.64	129.01	809.71	77.05	192.47	206.06	639.03
37.2	67.86	12.61	40.72	27.12	130.31	886.08	75.80	196.58	206.11	692.50
55.8	67.86	10.80	36.58	20.99	117.30	815.07	74.52	133.12	191.82	676.89
74.4	67.86	9.76	33.03	17.27	108.66	843.32	73.91	106.88	182.56	680.10
93.0	67.86	9.09	30.25	14.78	101.91	840.61	73.03	104.57	174.94	705.29
111.5	67.86	8.61	28.03	12.99	96.18	933.26	72.50	86.72	168.68	783.80
130.1	67.86	8.25	26.23	11.63	88.23	664.24	72.23	71.40	160.47	553.35
148.7	67.86	7.97	24.72	10.56	84.02	664.74	72.15	72.30	156.17	565.88
185.9	67.86	7.56	22.35	8.98	78.23	713.64	72.27	70.46	150.49	589.82
223.1	67.86	7.27	20.54	7.86	71.31	597.37	71.86	63.69	143.17	488.69
260.3	67.86	7.06	19.11	7.02	66.49	613.00	71.97	57.51	138.46	526.32

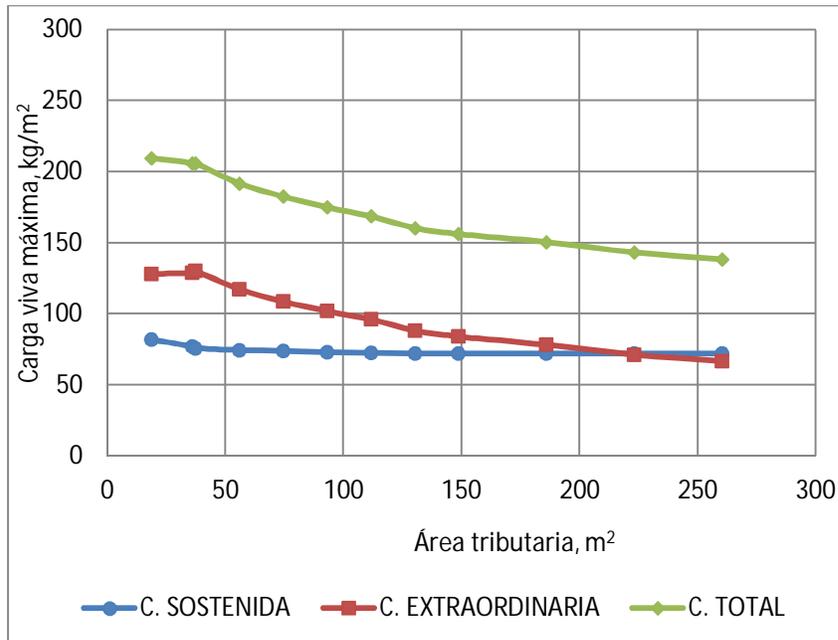


Figura 3.4 Valores medios de cargas máximas sostenida, extraordinaria y total, para aulas

Con el fin de establecer valores de las cargas de diseño, tomando en cuenta la reducción como función del área, de la carga máxima diseño (W_m) en edificios destinados a aulas, los valores que se presentan en última columna de la Tabla 3.6 se ajustaron a una probabilidad de excedencia de 50% aproximadamente, siguiendo el mismo procedimiento que se hizo para oficinas. Los parámetros α y u que aparecen en la Tabla 3.6 se obtuvieron a partir de las ecs 2.10 y 2.11, respectivamente.

Tabla 3.6 Parámetros para obtener la carga para el diseño de aulas con probabilidad de excedencia de 50%

Área [m ²]	$E[T]$ [kg/m ²]	$VAR[T]$ [kg/m ²] ²	α	u	P_{EX} [%]	W_m [kg/m ²]
18.59	209.78	815.59	0.04	196.93	50.00	205.09
36.00	206.06	639.03	0.05	194.68	50.00	201.91
37.18	206.11	692.50	0.05	194.27	50.00	201.79
55.77	191.82	676.89	0.05	180.12	50.00	187.55
74.36	182.56	680.10	0.05	170.83	50.00	178.28
92.95	174.94	705.29	0.05	163.00	50.00	170.59
111.54	168.68	783.80	0.05	156.08	50.00	164.08
130.13	160.47	553.35	0.05	149.89	50.00	156.61
148.72	156.17	565.88	0.05	145.47	50.00	152.27
185.90	150.49	589.82	0.05	139.57	50.00	146.51
223.08	143.17	488.69	0.06	133.23	50.00	139.54
260.26	138.46	526.32	0.06	128.14	50.00	134.70

Tomando como base la última columna de la Tabla 3.6, se obtuvo la ec 3.6 que corresponde al valor para la carga de diseño de aulas, tomando en cuenta la reducción como función del área tributaria (A).

$$75 + \frac{950}{\sqrt{A}} ; \quad A > 36\text{m}^2 \quad (3.6)$$

Para $A \leq 36 \text{ m}^2$ la carga de diseño se aproxima a 240 kg/m^2 .

El RCDF-2004 en sus Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural las Edificaciones (2004) recomienda una carga máxima de diseño de 250 kg/m^2 , sin permitir que se reduzca este valor al incrementar el área tributaria, lo que se representa con una línea continua en la Fig 3.5. En esta también se puede ver que la ec 3.6 da lugar a valores de carga máxima de diseño mayores que las que recomienda el documento ASCE 7/10.

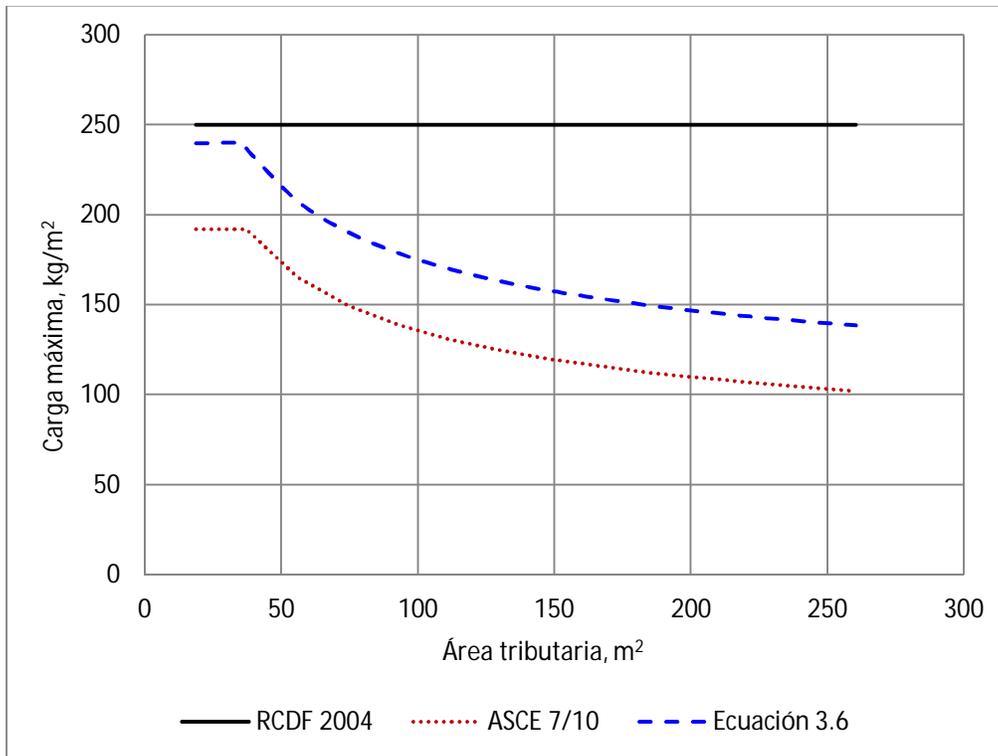


Fig 3.5 Valores de cargas vivas para el diseño de edificios para aulas

Con la ec 3.6 se obtienen probabilidades de excedencia (PE) aproximadamente uniformes de 50% para áreas tributarias moderadas y grandes, mientras que los valores recomendados en las NTC-2004 son menores que 5%, como se indica en la Fig 3.6. Por otro lado, para $A < 36\text{m}^2$ las probabilidades de excedencia son menores que 50% para ambos casos. La Fig 3.6 hace ver que la ecuación 3.6 cumple con el objetivo del presente estudio (ver sección 1.2) ya que da lugar a una carga máxima para el diseño de aulas con una PE cercana a 50%. Como se mencionó para el caso de oficinas, es necesario que se obtenga un valor de PE cercano a 50% debido a que se hizo la hipótesis que $PE=50\%$ para calcular los factores de carga que se recomendarán en la próxima versión de las NTC-2004 (Bojórquez y Ruiz, 2014a). Por otro lado, en las Fig 3.5 y 3.6 se puede apreciar que debido a que los valores de la carga de diseño que especifican las NTC-2004 son elevados (250 kg/m^2 para cualquier valor del área tributaria), entonces las PE de las cargas actuantes resultan pequeñas a medida que aumenta el área tributaria (ver línea con círculos rellenos de la Fig 3.6).

A partir de los resultados de este estudio se propone que las cargas para el diseño de aulas se reduzcan en función del área tributaria, lo que coincide con los estudios realizados por Harris, Corotis y Bova (1981) quienes muestran que las cargas para el diseño de los aulas decrecen con el área.

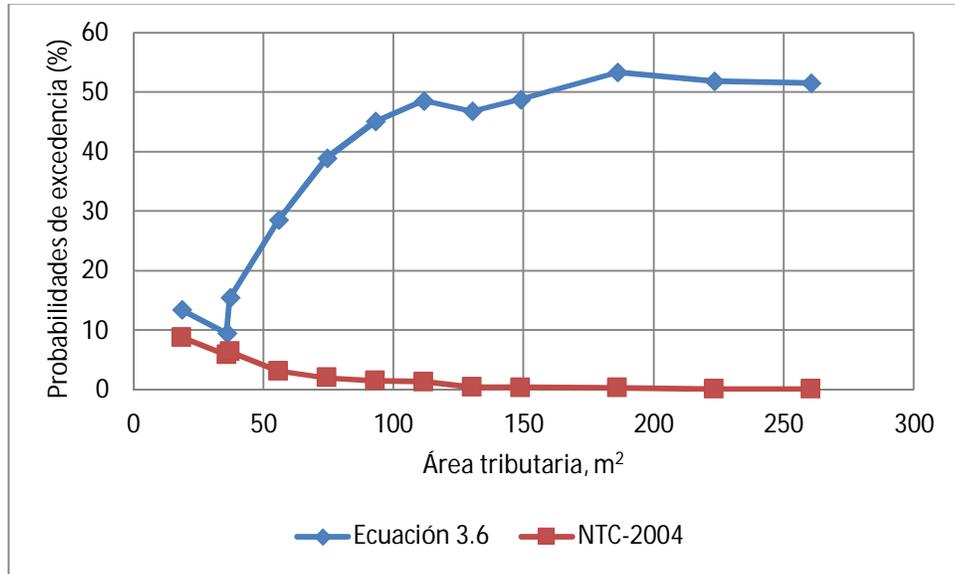


Fig 3.6 Probabilidades de excedencia de las cargas máximas para aulas

3.3 Análisis de cargas vivas en departamentos-habitación multifamiliares

Para el estudio de la carga de diseño en departamentos-habitación multifamiliares se suponen válidos los valores de media y varianza de la carga sostenida que obtuvieron Guillén Osorio y Ruiz Gómez (2003) para departamentos multifamiliares con áreas menores a 80 m². Estos valores son los siguientes:

$$m_u = 44.854 \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (3.7)$$

$$Var(u) = \frac{5250.394}{A} + 31.098 \text{ [kg/m}^2\text{]}^2 \quad (3.8)$$

Los datos de entrada requeridos para el proceso de simulación se presentan en la Tabla 3.7. El valor de v_s se supone igual a 0.20 debido a que los inquilinos de los departamentos multifamiliares se cambian a otro departamento en promedio cada 5 años (esto sucede principalmente con las personas que rentan un inmueble). Por otro lado, el valor de $v_{EX} = 1.00$ se propuso suponiendo que en cada departamento hay en promedio un evento que concentra un gran número de personas al año. Los valores anteriores se supusieron con base en la experiencia de los autores y a partir de preguntas que se hicieron a inquilinos de departamentos multifamiliares.

Tabla 3.7 Parámetros de entrada al programa de cómputo para la simulación de cargas en departamentos-habitación multifamiliares

T_R [años]	V_s [1/año]	V_{EX} [1/año]	m_u [kg/m ²]	σ_a [kg/m ²] ²	K_s [kg/m] ²
50	0.20	1.00	44.854	31.098	5250.394

Los datos de entrada y los resultados obtenidos del programa de simulación se muestran en la Tabla 3.8, y en la Fig 3.7 se muestra el comportamiento de los valores $E[EX]$, $E[LS]$ y $E[T]$ que se indican en las columnas 6, 8 y 10 de la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Datos de entrada y resultados de la carga máxima total para departamentos- habitación multifamiliares

Área [m ²]	m_u [kg/m ²]	σ_u [kg/m ²]	m_{EX} [kg/m ²]	σ_{EX} [kg/m ²]	$E[EX]$ [kg/m ²]	$VAR[EX]$ [kg/m ²] ²	$E[LS]$ [kg/m ²]	$VAR[LS]$ [kg/m ²] ²	$E[T]$ [kg/m ²]	$VAR[T]$ [kg/m ²] ²
18.59	44.85	25.54	39.16	39.83	150.87	1974.73	64.89	1128.84	215.76	1680.17
36.00	44.85	18.76	45.95	31.01	128.64	1092.53	59.66	476.41	188.30	933.49
37.18	44.85	18.49	45.69	30.42	129.55	1064.18	58.86	483.49	188.41	816.48
55.77	44.85	15.43	41.05	23.55	104.79	628.27	57.15	334.53	161.94	504.85
74.36	44.85	13.65	37.07	19.38	90.49	513.13	55.72	235.47	146.21	404.49
92.95	44.85	12.46	33.94	16.58	80.67	406.40	55.49	184.57	136.16	347.32
111.54	44.85	11.60	31.45	14.57	72.10	358.27	55.15	163.15	127.25	296.62
130.13	44.85	10.95	29.43	13.05	67.25	357.85	54.79	151.84	122.04	307.80
148.72	44.85	10.43	27.74	11.85	61.19	274.95	54.22	130.49	115.41	228.83
185.90	44.85	9.66	25.08	10.08	53.70	210.63	53.91	99.97	107.61	165.83
223.08	44.85	9.10	23.05	8.82	48.06	231.92	53.88	100.06	101.94	188.35
260.26	44.85	8.69	21.45	7.88	43.79	181.80	53.82	82.92	97.61	148.61

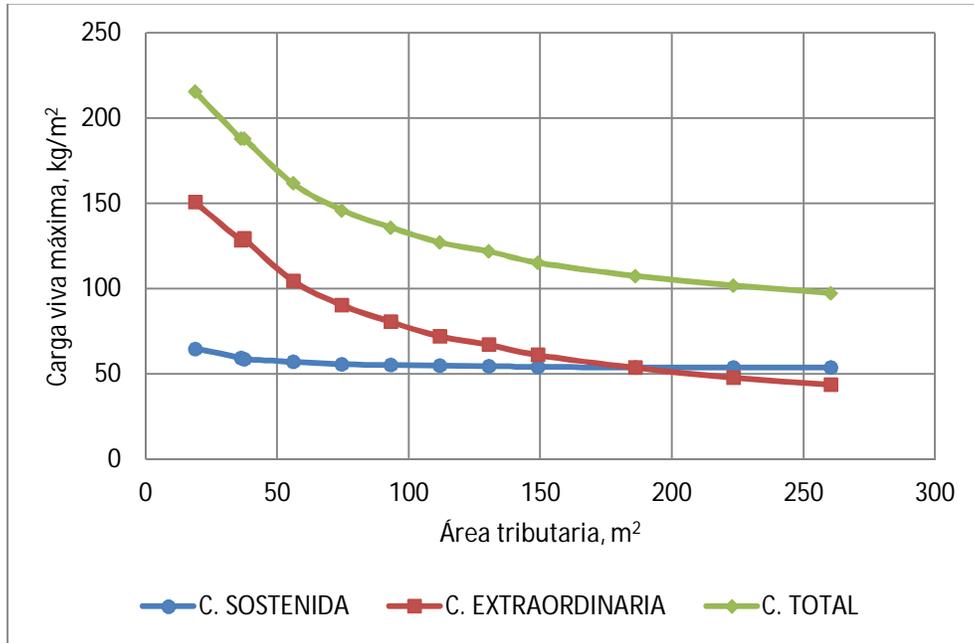


Fig 3.7 Valores medios de las cargas máximas sostenida, extraordinaria y total, para departamentos multifamiliares

En la segunda columna de la Tabla 3.8 se presentan las cargas máximas de diseño con probabilidades de excedencia variable. Con la finalidad de establecer una probabilidad de excedencia igual a 50%, los resultados de cargas máximas de diseño se ajustaron como se explica en la sección 2.3, y se presentan en la última columna de la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Parámetros para obtener la carga para el diseño de departamentos con probabilidad de excedencia de 50%

Área [m ²]	$E[T]$ [kg/m ²]	$VAR[T]$ [kg/m ²] ²	α	u	P_{EX} [%]	W_m [kg/m ²]
18.59	215.76	1680.17	0.03	197.32	50.00	209.03
36.00	188.30	933.49	0.04	174.55	50.00	183.28
37.18	188.41	816.48	0.04	175.55	50.00	183.72
55.77	161.94	504.85	0.06	151.83	50.00	158.25
74.36	146.21	404.49	0.06	137.16	50.00	142.91
92.95	136.16	347.32	0.07	127.77	50.00	133.10
111.54	127.25	296.62	0.07	119.50	50.00	124.42
130.13	122.04	307.80	0.07	114.15	50.00	119.16
148.72	115.41	228.83	0.08	108.60	50.00	112.93
185.90	107.61	165.83	0.10	101.81	50.00	105.49
223.08	101.94	188.35	0.09	95.77	50.00	99.69
260.26	97.61	148.61	0.11	92.12	50.00	95.61

El valor para la carga de diseño de departamentos multifamiliares, tomando en cuenta la reducción como función del área tributaria, definido a partir de la última columna de la tabla 3.9, para áreas mayores que 36 m², es la siguiente (ver línea con punto y raya de la Fig 3.8):

$$42 + \frac{865}{\sqrt{A}} \quad (3.9)$$

La carga de diseño para $A \leq 36\text{m}^2$ se aproxima a 190m²

Las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTC-2004) recomiendan una carga máxima para el diseño de departamentos igual a 170 kg/m², y un valor para la carga de diseño de departamentos multifamiliares, tomando en cuenta la reducción como función del área tributaria (A) como la que indica la línea continua en la Fig 3.8.

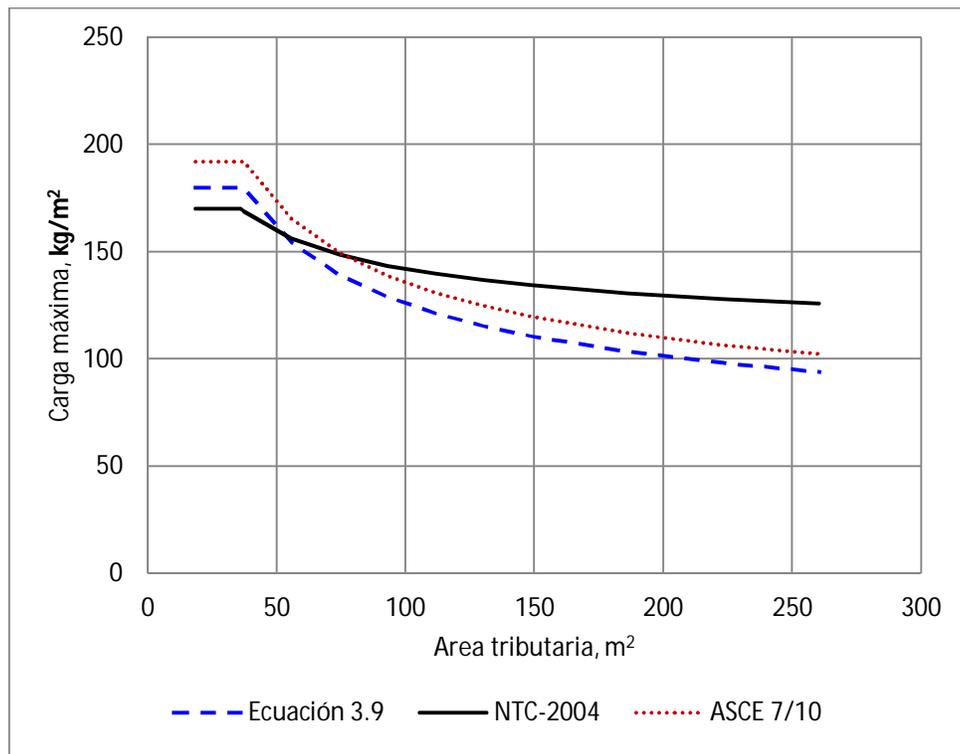


Fig 3.8 Valores de cargas vivas para el diseño de edificios para departamentos multifamiliares

Se hace notar que en la Fig 3.8 se muestran las cargas de diseño correspondientes tanto a departamentos (NTC-2004) como a departamentos multifamiliares (ASCE 7/10 y ec 3.9), por lo que estrictamente no son comparables ya que las NTC-2004 especifican valores de carga para el diseño de departamentos (que pueden incluir departamentos de lujo), y no para departamentos multifamiliares (Guillén Osorio y Ruiz Gómez, 2003). La Fig 3.9 muestra las probabilidades de excedencia (PE) de las cargas de diseño para departamentos (NTC-2004) y para departamentos multifamiliares (usando la ec 3.9). En

la Fig 3.9 se puede ver que el valor de la carga máxima correspondiente a la ec 3.9 da lugar a una probabilidad de excedencia (PE) de las cargas actuantes en departamentos multifamiliares de aproximadamente 50% con respecto a sus valores nominales de diseño, lo que implica que la ec 3.9 cumple con los objetivos de este estudio (ver sección 1.2). Por otro lado, en la Fig 3.9 se puede apreciar que para la carga recomendada por las NTC-2004 para el diseño de departamentos las PE tienden a disminuir con el área tributaria, mientras que la de este estudio (ec 3.9) mantiene probabilidades de excedencia aproximadamente constantes y cercanas a 50%. Nuevamente se hace notar que en este caso las PE no deben ser directamente comparables ya que las especificaciones de las NTC-2004 se refieren a departamentos (incluyendo los de lujo), mientras que para proponer la ec 3.9 solamente se tomaron en cuenta departamentos multifamiliares con áreas menores de 80 m².

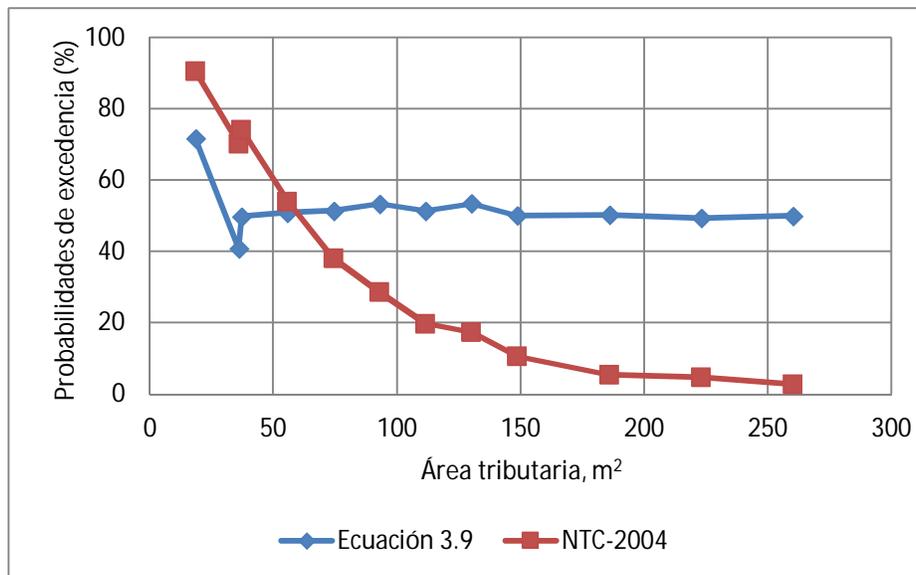


Fig 3.9 Probabilidades de excedencia de las cargas para el diseño de departamentos

3.4 Análisis de cargas vivas en cuartos de hotel

Para el estudio de las cargas para el diseño de cuartos de hotel (sencillos y de lujo) se tomaron como válidos los valores de media y varianza en función del área (A) obtenidos por Guillén Osorio (1998) y por Gutiérrez Castillo (2013). Los resultados son los siguientes:

$$m_u = 43.510 \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (3.10)$$

$$Var(u) = \frac{879.6}{A} + 178.7 \text{ [kg/m}^2\text{]}^2 \quad (3.11)$$

Los parámetros requeridos en este caso para el proceso de simulación se presentan en la Tabla 3.10. Al igual que para los casos analizados en las secciones anteriores (oficinas,

aulas y departamentos multifamiliares), los valores de v_s y v_{EX} se supusieron con base en la experiencia de los autores y en preguntas realizadas a los administradores de los hoteles.

Tabla 3.10 Parámetros de entrada al programa de cómputo para la simulación de cargas en cuartos de hotel

T_R [años]	V_s [1/año]	V_{EX} [1/año]	m_u [kg/m ²]	σ_a [kg/m ²] ²	K_s [kg/m] ²
50	0.05	1.00	43.510	178.7	879.6

Del programa de simulación se obtuvieron los resultados de la Tabla 3.11. La descripción de lo que representa cada columna de la Tabla 3.11 es igual a la de la Tabla 3.2

Tabla 3.11 Datos de entrada y resultados de la carga máxima total para cuartos de hotel

Área [m ²]	m_u [kg/m ²]	σ_u [kg/m ²]	m_{EX} [kg/m ²]	σ_{EX} [kg/m ²]	$E[EX]$ [kg/m ²]	$VAR[EX]$ [kg/m ²] ²	$E[LS]$ [kg/m ²]	$VAR[LS]$ [kg/m ²] ²	$E[T]$ [kg/m ²]	$VAR[T]$ [kg/m ²] ²
18.59	43.51	16.83	39.16	39.83	193.21	1956.87	48.17	339.40	241.38	1957.13
36.00	43.51	15.26	45.95	31.01	156.66	894.07	47.70	237.03	204.36	958.81
37.18	43.51	15.20	45.69	30.42	152.58	814.01	49.31	277.27	201.89	827.37
55.77	43.51	14.62	41.05	23.55	121.95	498.97	49.75	274.18	171.70	575.32
74.36	43.51	14.32	37.07	19.38	102.27	303.25	49.95	237.55	152.22	362.59
92.95	43.51	14.14	33.94	16.58	88.21	265.47	51.72	232.52	139.93	311.85
111.54	43.51	14.01	31.45	14.57	78.80	235.51	52.65	244.15	131.45	278.73
130.13	43.51	13.92	29.43	13.05	71.25	162.70	52.24	225.20	123.48	241.25
148.72	43.51	13.86	27.74	11.85	65.12	150.30	53.57	239.59	118.69	233.44
185.90	43.51	13.76	25.08	10.08	56.05	127.65	53.78	210.36	109.83	218.54
223.08	43.51	13.70	23.05	8.82	49.47	101.53	54.79	211.96	104.26	201.71
260.26	43.51	13.65	21.45	7.88	44.59	86.66	55.89	197.91	100.48	178.98

Los resultados que se muestran en las columnas 6, 8 y 10 de la Tabla 3.11 representan los valores medios de las cargas máximas extraordinaria, sostenida y total. Estos resultados se muestran gráficamente en la Fig 3.10.

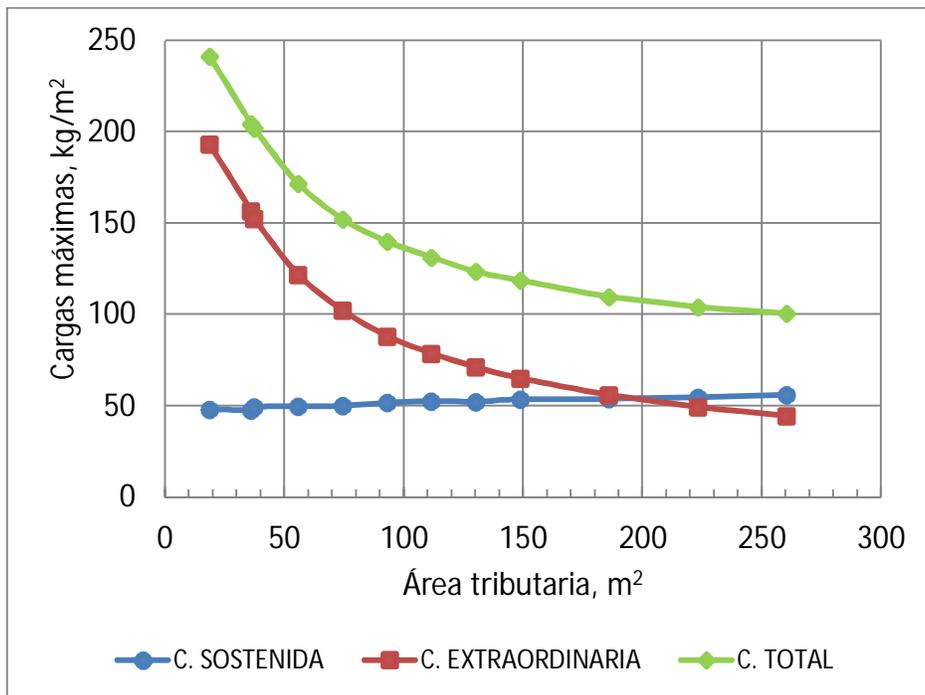


Fig 3.10 Valores medios de las cargas máximas sostenida, extraordinaria y total, para cuartos de hotel

De manera similar al procedimiento que se siguió para los destinos anteriores (oficinas, aulas y departamentos multifamiliares), los valores que se presentan en la penúltima columna de la Tabla 3.11 se ajustaron de manera que dieran lugar a una probabilidad de excedencia cercana a 50%, para así establecer valores de las cargas de diseño de cuartos de hotel, tomando en cuenta la reducción como función del área (ver ec 3.12). Los cálculos se presentan en la Tabla 3.12. Los parámetros α y u que aparecen en la Tabla 3.12 se obtuvieron a partir de las ecs 2.10 y 2.11, respectivamente.

$$39 + \frac{956}{\sqrt{A}} \tag{3.12}$$

Para $A \leq 36 \text{ m}^2$ la carga de diseño es aproximadamente de 195 kg/m^2 .

En la Fig 3.11 se puede apreciar que los valores que arroja la expresión 3.12 son muy parecidos a los valores que se especifican en el documento ASCE/SEI 7-10. También se puede ver que carga de diseño que recomiendan las NTC-2004 para $A < 75 \text{ m}^2$ es menor que la dada por la ec 3.12, y que sucede lo contrario para $A \geq 75 \text{ m}^2$.

Tabla 3.12 Parámetros que intervienen para el cálculo de la carga para el diseño de cuartos de hotel con probabilidad de excedencia de 50%

Área [m ²]	$E[T]$ [kg/m ²]	$VAR[T]$ [kg/m ²] ²	α	u	P_{EX} [%]	W_m [kg/m ²]
18.59	241.38	1957.13	0.03	221.48	50.00	234.12
36.00	204.36	958.81	0.04	190.43	50.00	199.28
37.18	201.89	827.37	0.04	188.95	50.00	197.17
55.77	171.70	575.32	0.05	160.91	50.00	167.76
74.36	152.22	362.59	0.07	143.66	50.00	149.10
92.95	139.93	311.85	0.07	131.98	50.00	137.03
111.54	131.45	278.73	0.08	123.94	50.00	128.71
130.13	123.48	241.25	0.08	116.49	50.00	120.93
148.72	118.69	233.44	0.08	111.82	50.00	116.18
185.90	109.83	218.54	0.09	103.18	50.00	107.41
223.08	104.26	201.71	0.09	97.87	50.00	101.93
260.26	100.48	178.98	0.10	94.46	50.00	98.28

Las probabilidades de excedencia de las cargas de diseño para edificios destinados a cuartos de hotel, según las NTC-2004 y según la ec 3.12, tienen el comportamiento que se indica en la Fig 3.12. La figura indica que la ec 3.12 da lugar a probabilidades de excedencia cercanas a 50% para áreas tributarias mayores de 36m², por lo que se cumple con los objetivos de este estudio (ver sección 1.2); mientras que las correspondientes a las NTC-2004 son mucho menores a medida que el área se incrementa. Esto se debe a que los valores de las cargas de diseño calculadas de acuerdo con las especificaciones de las NTC-2004 son mayores que las obtenidas con la ec 3.12 a medida que el área tributaria crece. Se hace la observación de que no existe algún estudio de tipo experimental realizado en México que justifique los valores de las cargas de diseño que recomiendan las NTC-2004.

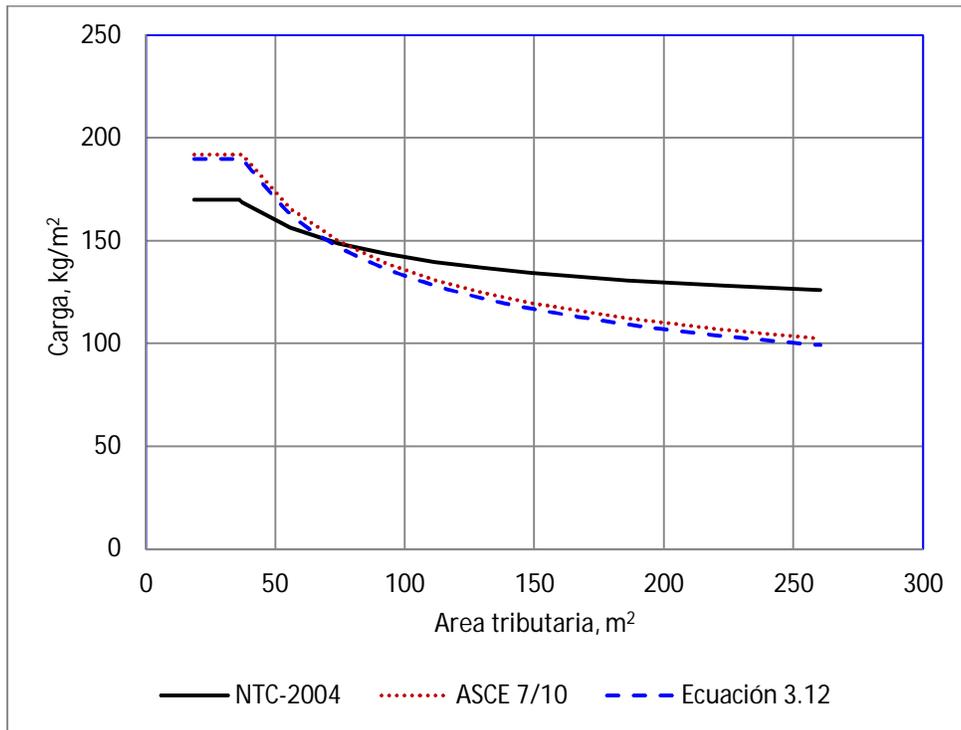


Fig 3.11 Cargas vivas máximas para el diseño de cuartos de hotel

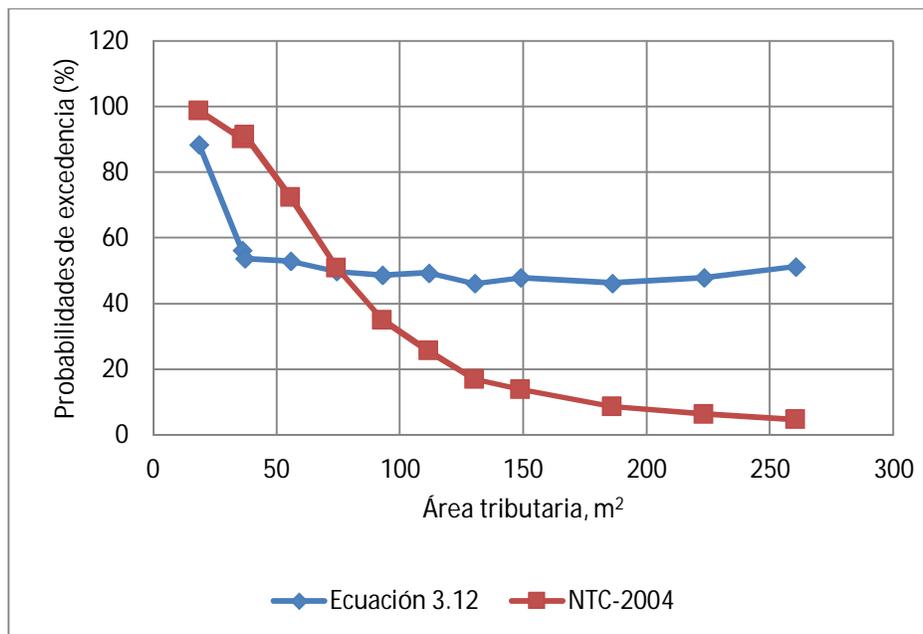


Fig 3.12 Probabilidades de excedencia de las cargas para el diseño de cuartos de hotel

En lo que sigue se revisan los resultados obtenidos del estudio de las cargas vivas máximas en entresijos de los edificios analizados en el capítulo anterior, con el fin de establecer expresiones que definan el comportamiento de dichas cargas de diseño con una probabilidad de excedencia uniforme con el área. Del análisis se concluye que el comportamiento de las cargas de diseño con probabilidades de excedencia de 50% son muy similares para oficinas y aulas, y por otro lado también se ve que son muy parecidos para departamentos multifamiliares y cuartos de hotel, por lo que en la sección 4.1 se proponen *dos ecuaciones* de carga de diseño según el comportamiento observado 1) para oficinas y aulas, y 2) para cuartos de hotel y departamentos.

4 DOS PROPUESTAS DE REDUCCIÓN DE VALORES DE CARGAS VIVAS MÁXIMAS EN FUNCIÓN DEL ÁREA

4.1 Expresiones sobre la reducción de carga con probabilidad de excedencia aproximadamente constante

Las ecs 3.3, 3.6, 3.9 y 3.12 para edificios con uso de oficinas, salones de clase, departamentos multifamiliares y cuartos de hotel, respectivamente, se presentan en la Fig 4.1. En ésta se observa que los valores de la carga máxima son muy similares para el diseño de edificios de oficinas y aulas, y asimismo, para los edificios de departamentos multifamiliares y cuartos de hotel.

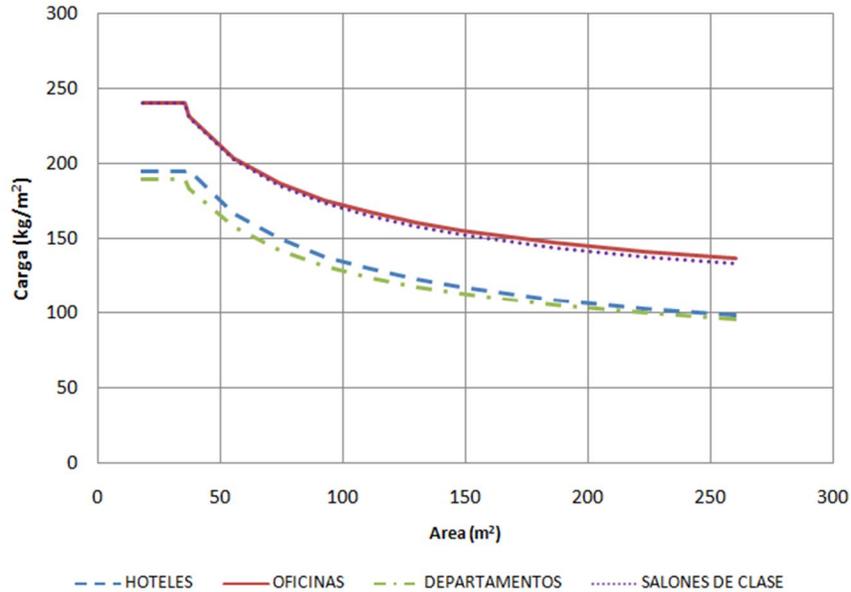


Fig 4.1 Cargas vivas máximas de diseño usando las ecs 3.3, 3.6, 3.9 y 3.12

Las leyes de reducción implícitas en las ecs 3.3, 3.6, 3.9 y 3.12 se pueden re-escribir de la siguiente manera:

Oficinas:

$$W_m \left(0.333 + \frac{3.854}{\sqrt{A}} \right) \quad (4.1)$$

Aulas:

$$W_m \left(0.3125 + \frac{3.958}{\sqrt{A}} \right) \quad (4.2)$$

Departamentos multifamiliares:

$$W_m \left(0.215 + \frac{4.436}{\sqrt{A}} \right) \quad (4.3)$$

Cuartos de hotel:

$$W_m \left(0.20 + \frac{4.903}{\sqrt{A}} \right) \quad (4.4)$$

donde

W_m es el valor de la carga máxima que corresponde a áreas tributarias menores de 36m².

Como se puede ver, las ecs 4.1 y 4.2 tienen parámetros parecidos, por lo que es posible obtener una sola ecuación para el diseño de oficinas y aulas, como sigue:

$$W_m \left(0.33 + \frac{4.0}{\sqrt{A}} \right) \quad [kg/m^2] \quad (4.5)$$

donde

$W_m = 240 \text{ kg/m}^2$ tanto para oficinas como para aulas.

Por otro lado, para el diseño de departamentos y de cuartos de hotel se propone también una sola ecuación:

$$W_m \left(0.235 + \frac{4.65}{\sqrt{A}} \right) \quad [kg/m^2] \quad (4.6)$$

donde

$W_m = 180 \text{ kg/m}^2$ para departamentos multifamiliares

$W_m = 190 \text{ kg/m}^2$ para cuartos de hotel

Con las expresiones dadas por las ecs 4.5 y 4.6 se obtiene una probabilidad de excedencia cercana a 50% principalmente para áreas moderadas y grandes, para cada uno de los destinos de uso en estudio, como se muestra en las Figs 4.2 a 4.5. En éstas se muestran también las probabilidades de excedencia de las cargas máximas de diseño recomendadas por las NTC-2004.

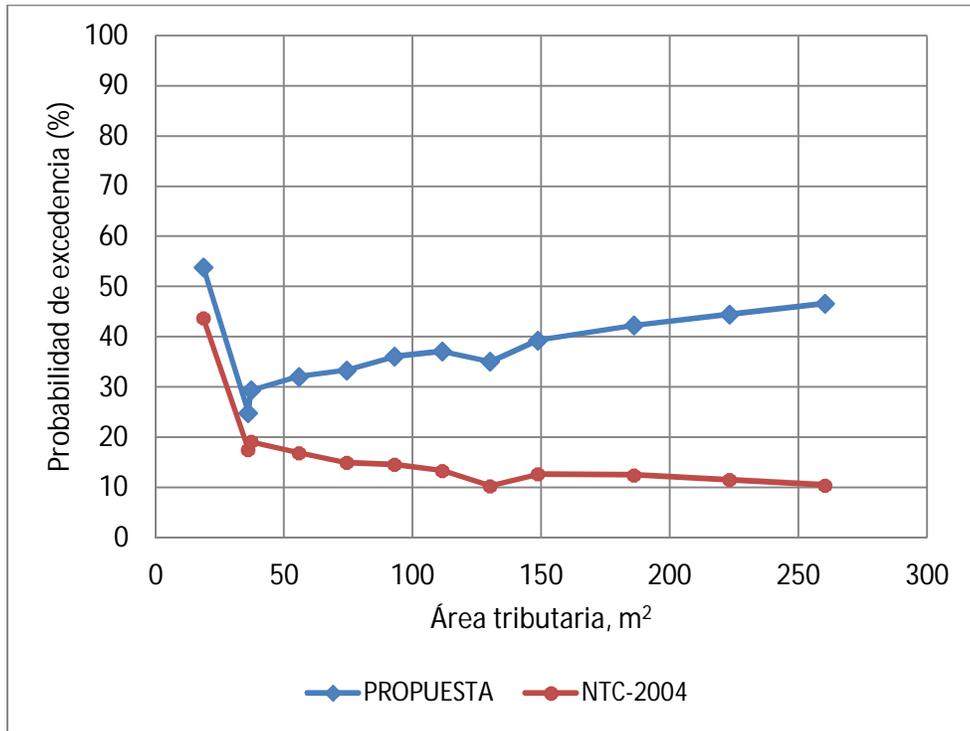


Fig 4.2 Probabilidades de excedencia para oficinas de acuerdo con la ec 4.5

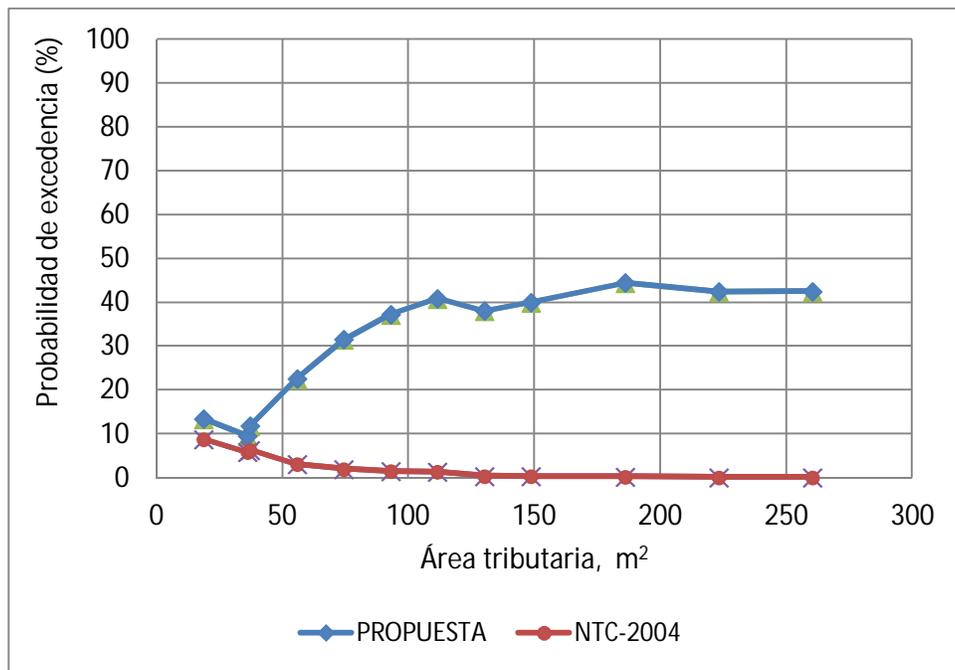


Fig 4.3 Probabilidades de excedencia para aulas de acuerdo con la ec 4.5

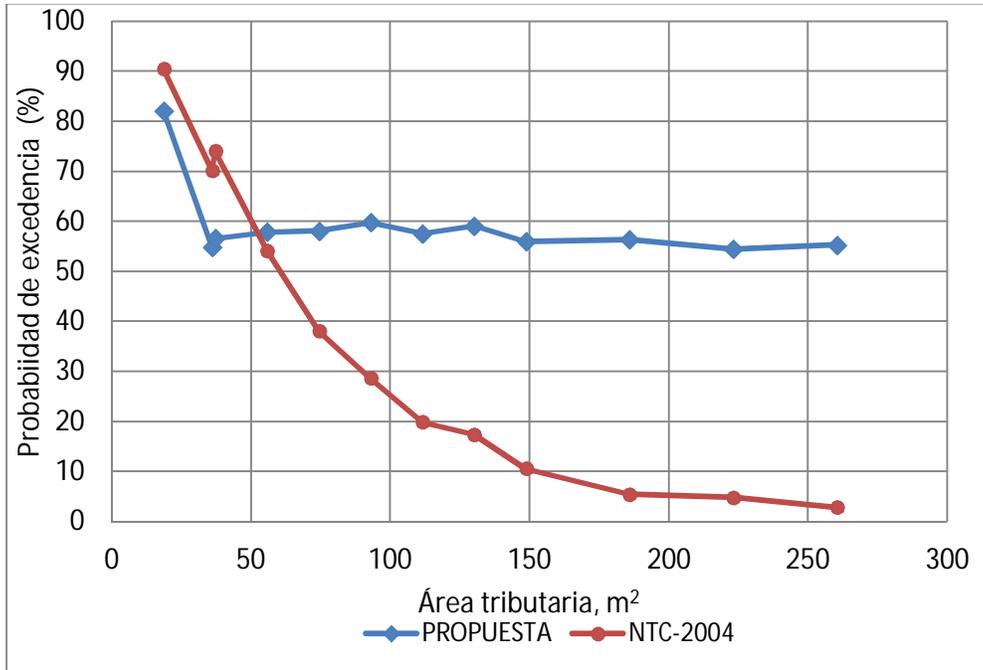


Fig 4.4 Probabilidades de excedencia para departamentos multifamiliares de acuerdo con la ec 4.6

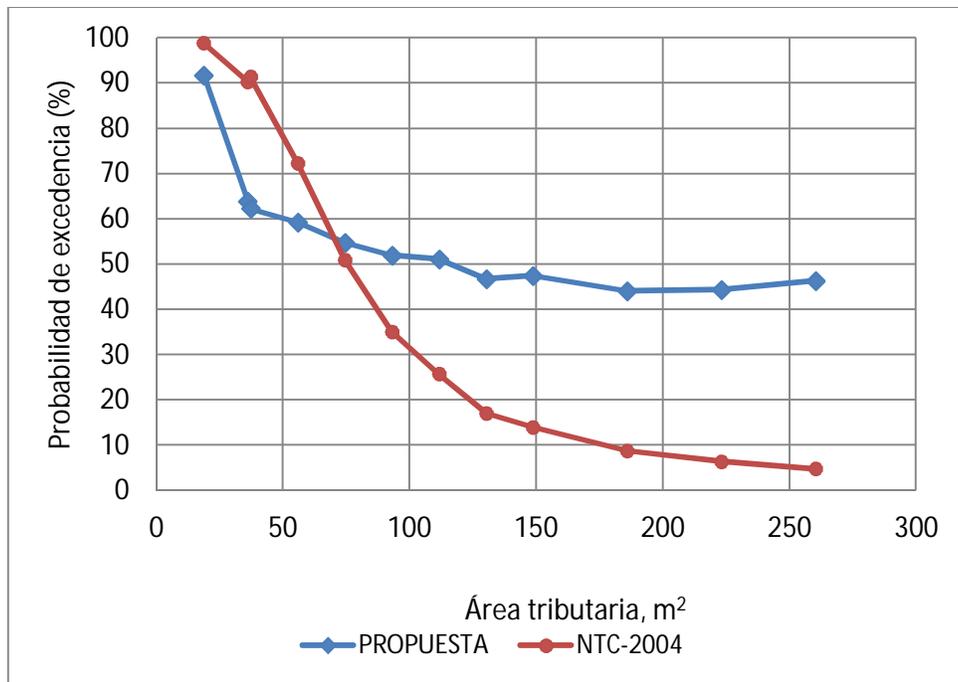


Fig 4.5 Probabilidades de excedencia para cuartos de hotel de acuerdo con la ec 4.6

4.2 Comparación de las expresiones propuestas versus los valores que recomiendan el ASCE/SEI 7-10 y las NTC-2004

Las ecs 4.5 y 4.6 de reducción de carga viva máxima de diseño son similares a la expresión general propuesta por el ASCE/SEI 7-10, que es como sigue:

$$L_o \left(0.25 + \frac{4.57}{\sqrt{K_{LL} A_T}} \right) \quad (4.7)$$

El significado de L_o es similar al de W_m que aparece en las ecs 4.5 y 4.6.

El ASCE/SEI 7-10 recomienda cargas máximas $L_o = 192 \text{ kg/m}^2$ para áreas de influencia menores de 37.2 m^2 (400 ft^2), para el diseño de edificios destinados a aulas, departamentos y cuartos de hotel (ver parte horizontal de la línea discontinua de la Fig 4.11), mientras que para edificios con uso de oficinas la carga máxima de diseño es de 240 kg/m^2 (ver parte horizontal de la línea continua de la Fig 4.11).

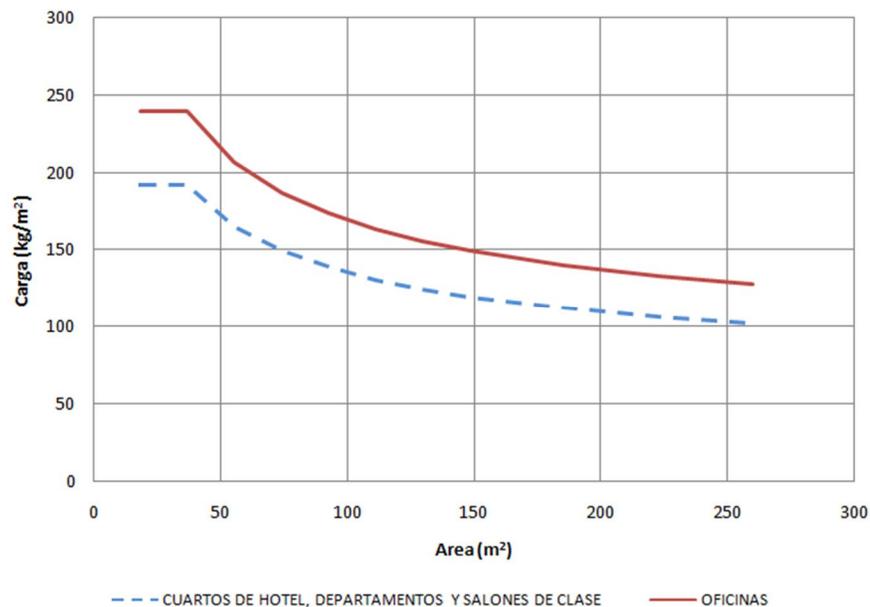
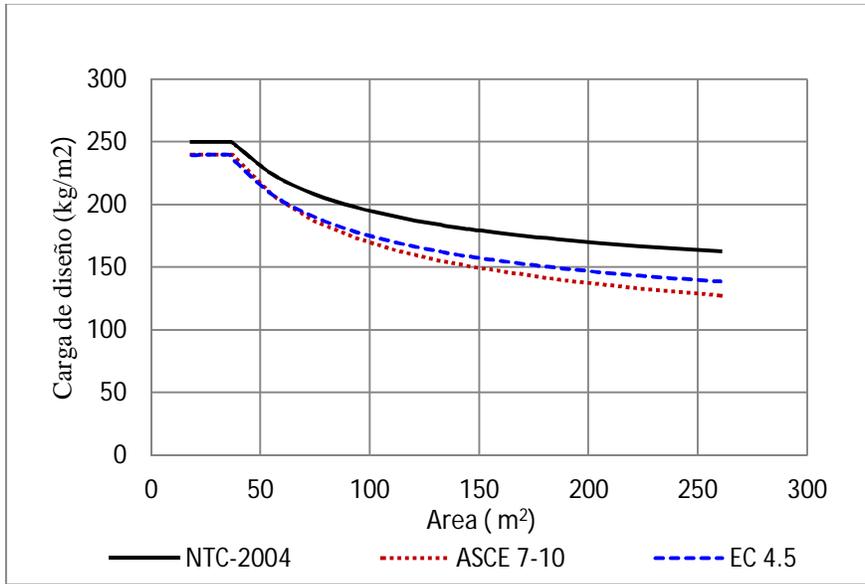


Fig 4.11 Cargas vivas máximas de diseño recomendadas por el ASCE/SEI 7-10

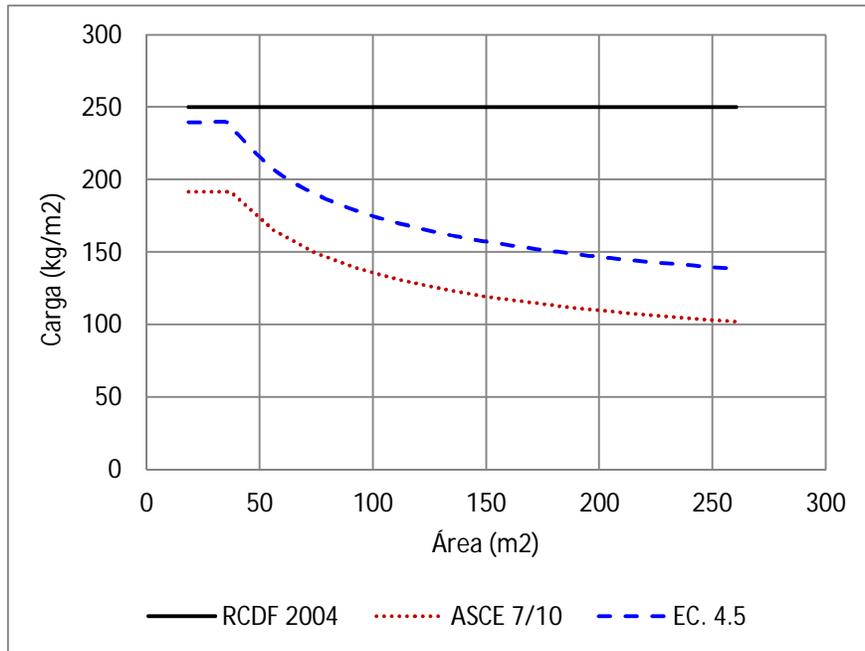
Es conveniente mostrar que la ec 4.7 toma en cuenta la importancia de los elementos estructurales en la reducción de la carga de diseño. El factor K_{LL} en la ec 4.7 implica una reducción en la carga de diseño que considera el efecto de la carga en los elementos estructurales (Ellinwood y Culver, 1977)). El factor K_{LL} varía entre 1 y 4, dependiendo del tipo de elemento estructural que se trate (columnas interiores, columnas de esquina, vigas interiores, etc). La Fig 4.11 muestra los valores de las cargas de diseño en función del área recomendados por el ASCE/SEI 7-10 cuando se usa $K_{LL}=1.0$, que corresponde al valor de más desfavorable de la carga de diseño L (ver ec 4.8).

En las Figs 4.12a, b c y d, correspondientes a oficinas, aulas, departamentos multifamiliares y cuartos de hotel, respectivamente se comparan los valores de cargas de diseño recomendados por el ASCE/SEI 7-10 con las ecs 4.5 y 4.6, así como con los valores recomendados por las NTC-2004. En las Figs 4.12a-d se puede observar lo siguiente:

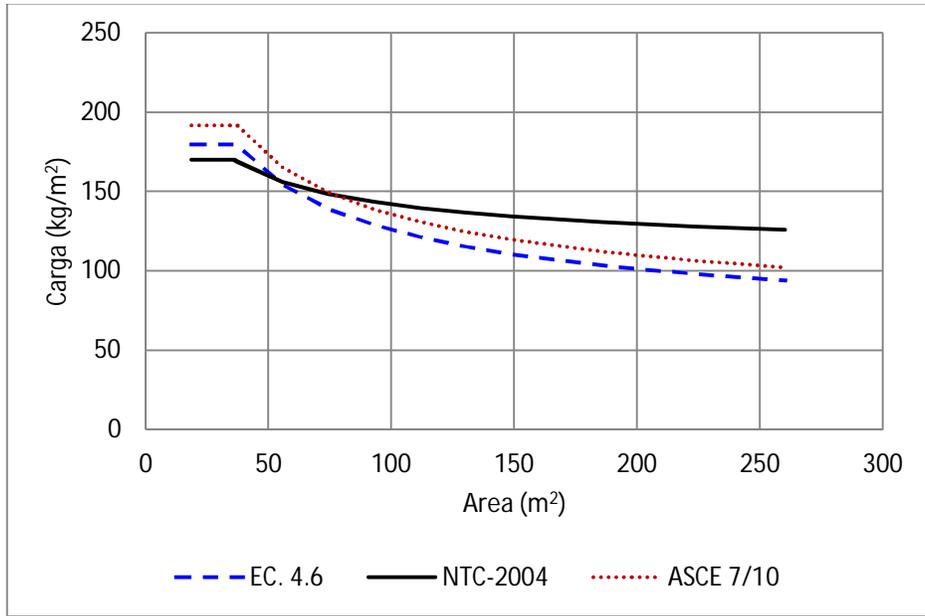
- 1) Los valores de cargas para el diseño de oficinas y de cuartos de hotel (Figs 4.12a y d) obtenidos en este estudio, resultado de estudios del análisis de cargas vivas en edificios en México, son similares a los recomendados por el ASCE/SEI 7-10, correspondiente a edificios en Estados Unidos de América.
- 2) Los valores de carga para el diseño de salones de clase obtenidos en este estudio son más altos que los recomendados por el ASCE/SEI 7-10, pero menores a los especificados en las NTC-2004 (ver Fig 4.12b). Se hace notar que las NTC-2004 no permiten que las cargas de diseño de aulas se reduzcan con el área tributaria. Esto se debe a que cuando se redactaron las NTC-2004 no existía un estudio en México en el que se considerara la condición de que la probabilidad de excedencia de la carga nominal para el diseño aulas fuese constante en función de dicha área. A partir de los análisis del presente estudio se propone que las cargas de diseño para aulas se reduzcan en función del área tributaria.
- 3) Los valores de carga máxima para el diseño de departamentos multifamiliares (Fig 4.12c) que se obtienen en el presente estudio (ec 4.6) son menores a los recomendados por el ASCE/SEI 7-10, pero mayores a los recomendados por las NTC-2004 para departamentos para áreas tributarias menores de 50m²; sin embargo, para áreas mayores que este valor, los valores resultan más pequeños. Se hace notar que los departamentos a los que se refieren las NTC-2004 no son departamentos multifamiliares sino departamentos que incluyen a los de lujo.
- 4) Los valores de la carga de diseño para cuartos de hotel que se obtienen del presente estudio resultan mayores que los que se recomiendan en las NTC-2004 para áreas menores que 70m²; sin embargo, para áreas más grandes que este valor, los valores resultan menores. Se hace la observación que los cuartos de hotel que se consideraron en este estudio incluyen tanto cuartos sencillos como cuartos de lujo (Guillén Osorio, 1998; Gutiérrez Castillo, 2013).



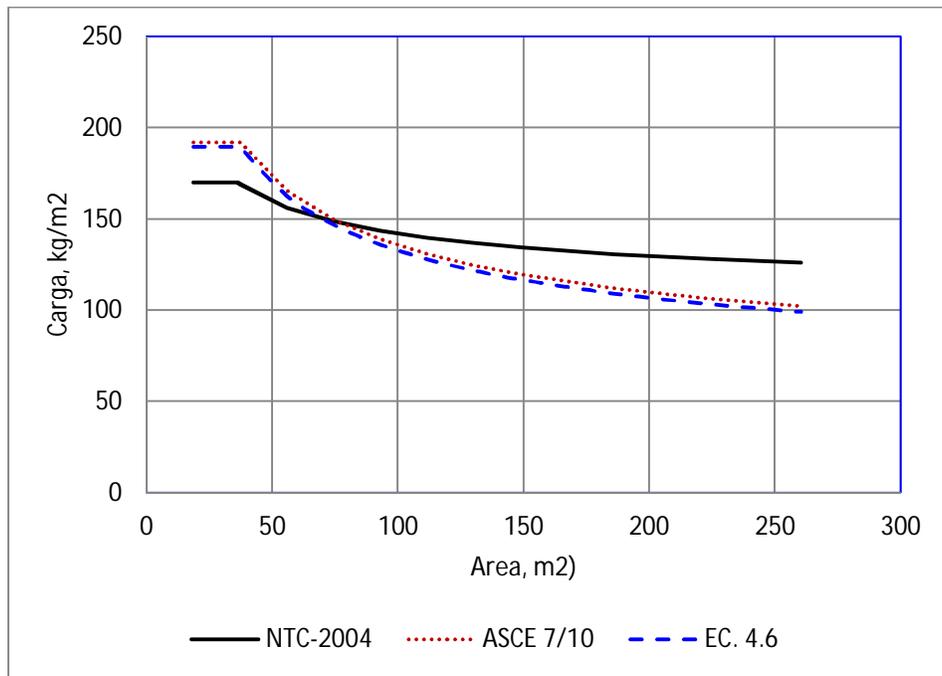
a) Oficinas



b) Aulas



c) Departamentos multifamiliares



d) Cuartos de hotel

Fig 4.12 Cargas de diseño del ASCE/SEI 7-10 versus ecs 4.5 y 4.6 propuestas en este estudio

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio muestra que las Normas Técnicas Complementarias sobre Diseño y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTC-2004) recomiendan valores de cargas vivas máximas para el diseño de edificios (i.e., oficinas, aulas, cuartos de hotel y departamentos multifamiliares) que presentan probabilidades de ser excedidos que no son constantes en función del área tributaria. Por ejemplo, las cargas nominales para el diseño de oficinas presentan probabilidades de ser excedidas entre 20 y 10 por ciento correspondientes a áreas tributarias entre 36 y 260 m², respectivamente; mientras que las cargas para el diseño de cuartos de hotel presentan probabilidades de excedencia entre 90 y 5 por ciento para el mismo intervalo de área tributaria.

Dado que la próxima versión de las NTC especificará valores de factores de carga que se obtuvieron de un estudio en donde se hace la hipótesis que las probabilidades de excedencia de las cargas vivas máximas nominales deben ser constantes con el área tributaria e iguales a 50 por ciento, se concluye que es necesario que en la próxima versión de las NTC se modifiquen las especificaciones de cargas de diseño al menos de los tipos de edificaciones que se analizan en el presente estudio.

Con base en lo anterior se propone que se modifiquen los incisos a, b y c de la Tabla 6.1 de las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTC-2004) de la siguiente manera:

- **Inciso a de la tabla 6.1 de las NTC-2004 referente a “Habitación (casa-habitación, departamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, internado de escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares)”**. Se propone que se elimine *cuartos de hotel*, y que los valores de las cargas para el diseño de cuartos de hotel se añadan en un inciso nuevo. También se recomienda que para todos los demás destinos de uso dentro de este inciso (excepto *cuartos de hotel*) se mantengan las mismas observaciones para el destino de **“Habitación”** que aparecen en las actuales NTC-2004 (ver última columna de la tabla 6.1), así como la misma carga máxima W_m (que se especifica en la tercera columna de la tabla 6.1) e iguales valores de carga de diseño considerando la reducción como función del área tributaria (A), quedando como sigue:

$$W_m = \begin{cases} 170 \text{ kg/m}^2 ; A \leq 36\text{m}^2 \\ 100 + \frac{420}{\sqrt{A}} ; A > 36\text{m}^2 \end{cases}$$

- **Incisos b y c de la tabla 6.1 de las NTC-2004 referentes a "Oficinas, despachos y laboratorios" y a "Aulas"**. Se propone que se una en un solo inciso lo relativo a "Oficinas, despachos y laboratorios" y a "Aulas". Se recomienda que para estos cuatro destinos de piso (**oficinas, despachos, laboratorios y aulas**) se mantengan las mismas observaciones que aparecen en las NTC-2004 para oficinas, despachos y laboratorios, y que se sustituyan los valores de carga de diseño, considerando la reducción como función del área tributaria (A), que aparecen en las actuales NTC-2004, por la siguiente expresión:

$$W_m = \begin{cases} 240 \text{ kg/m}^2 ; A \leq 36\text{m}^2 \\ 80 + \frac{960}{\sqrt{A}} ; A > 36\text{m}^2 \end{cases}$$

- **Se propone que se añada un inciso relativo a "Departamentos multifamiliares"**. Nótese que este destino de piso es diferente a la categoría de "departamentos" que aparece en el inciso "a" de la tabla 6.1 de las NTC-2004. Las cargas máximas que se obtienen del presente estudio para el diseño de departamentos multifamiliares son las siguientes:

$$W_m = \begin{cases} 180 \text{ kg/m}^2 ; A \leq 36\text{m}^2 \\ 40 + \frac{840}{\sqrt{A}} ; A > 36\text{m}^2 \end{cases}$$

- **Se propone que se elimine "cuartos de hotel" del inciso "a" de la tabla 6.1, y se añada un nuevo inciso referente a este destino de uso**. Las cargas máximas que se obtienen del presente estudio para el diseño de cuartos de hotel son las siguientes:

$$W_m = \begin{cases} 190 \text{ kg/m}^2; & A \leq 36\text{m}^2 \\ 43 + \frac{882}{\sqrt{A}} & ; A > 36\text{m}^2 \end{cases}$$

AGRADECIMIENTOS

Se agradecen los valiosos comentarios de L. Esteva, Coordinador del Comité Revisor de las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTC-2004). Así mismo, se agradecen a dos revisores anónimos sus atinadas observaciones que ayudaron a enriquecer el presente escrito.

El estudio se realizó dentro del convenio específico de colaboración IISGCONV-120-2013 entre el Instituto para la Seguridad de las Construcciones en el Distrito Federal y la Universidad Nacional Autónoma de México.

REFERENCIAS

Benjamin, J. R. y Cornell, C. A., *Probability Statistics and Decision for Civil Engineers*. McGraw Hill, 1970.

Bojórquez Mora, J. y Ruiz Gómez, S. E. *Factores de Carga y de Resistencia para el Diseño de Estructuras de C/R ante Cargas Viva y Muerta*, sometido a posible publicación en la Serie I&D del Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

Bojórquez J. y Ruiz, S. E. An Efficient Approach to Obtain Optimal Load Factors for Structural Design, *Scientific World Journal*, Vol. 2014, Art. ID 456826, Hindawi Publishing Corporation, julio 2014.

Culver, C., Survey Results for Fire Loads and Live Loads in Office Buildings, *NBC Building Science Series*, 85, National Bureau of Standards, Washington, D. C. mayo 1976.

Chalk, L. P. y Corotis, R. B. Probability Model for Design Live Loads. *Journal of the Structural Division*, ASCE, No. ST10, 2017-2033, octubre 1980

Ellinwood, B. R. y Culver, C. G., Analysis of Live Loads in Office Buildings. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 103, No. ST8, 1551-1560, 1977.

Guillén Osorio, J., Cargas Vivas Máximas para Cuartos de Hotel, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 1998.

Guillén Osorio, J. y Ruiz Gómez, S. E., *Cargas Vivas Máximas de Diseño para Departamentos Habitación de Interés Social*, Serie Investigación y Desarrollo SID/637, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F., 2003.

Gutiérrez Castillo, E., Ley de Reducción General de Cargas Vivas Máximas en Función del Área, para el Diseño de Edificaciones, Tesis de Maestría, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.

Harris, M. E., Corotis, R. B., y Bova, C. J., Area-Dependent Processes for Structural Live Loads. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 107, No. ST5, 857-872, mayo 1981.

Jauffred, F. J., Carga Viva en Unidades de Habitación y Oficina en el Distrito Federal, *Revista Ingeniería*, 60-75, octubre 1960.

Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, ASCE/SEI 7-10, 2010.

Mathworks. Matlab R2008b. The Mathworks Inc., 1984.

McGuire, G. R. y Cornell, C. A., Live Load Effects in Office Buildings. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 100, No. ST7, 1351-1366, 1974.

Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Distrito Federal, Tomo II, No. 103-Bis, octubre 2004.

Pier, J. C. y Cornell, C. A., Spatial and Temporal Variability of Live Loads. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 99, No. ST5, 903-922, 1973.

Rosenblueth, E., Teoría de la Carga Viva en Edificios. *Revista Ingeniería*, Publicación de Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., oct 1959.

Rubinstein, R. Y., *Simulation and the Monte Carlo Method*. John Wiley and Sons, Inc., 1981.

Ruiz, S. E. y Sampayo Trujillo A, "Design Live Loads for Classrooms in USA and Mexico", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol 123, No. 12, 1652-1657, diciembre 1997.

Ruiz, S. E. y Soriano, A, "Design Live Loads for Office Buildings in Mexico and the United States", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No.6, 816-822, junio 1997.

Sampayo Trujillo, A., Cargas Vivas de Diseño en Salones de Clase. División de Estudios de Posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, C.U., México D.F., 1998.

Sampayo Trujillo, A. y Ruiz Gómez, S. E., *Cargas Vivas Máximas de Diseño para Salones de Clase*. Instituto de Ingeniería, Series del Instituto de Ingeniería, 621, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 2001.

Sobol, I. M., *Método de Montecarlo*. Editorial MIR, URSS, Moscú, 1983.

Soriano Martínez, J. A., Ruiz Gómez, S. E., Vázquez Hernández J. M., Cervantes Vásquez, G. y Urrego Giraldo O. E., *Cargas Vivas Máximas de Diseño para Edificios de Oficinas en la Ciudad de México*. Series del Instituto de Ingeniería, 623, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F., 2001.

Wen, Y. K., Statistical Combination of Extreme Loads. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 103, No. ST5, 1079-1093, mayo 1977.

Wen, Y. K., Statistics of Extreme Live Loads on Buildings. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 105, No. ST10, 1893-1900, octubre1979.

Wen, Y. K. y Yeo, G. L., *Design Live Loads for Parking Garages: A Report to the Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers*, ASCE, ISBN: 0-7844-0534-4, 2000.

La obra *Cargas vivas máximas en función del área tributaria para edificaciones en el Distrito Federal* fue editada por el Instituto de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de México (IIUNAM), en Ciudad Universitaria, CP 04510, México, DF. El cuidado de la edición estuvo a cargo de Israel Chávez Reséndiz, de la Unidad de Promoción y Comunicación del II UNAM. Esta obra está gratuitamente disponible para consulta e impresión, en archivo pdf de 1.7 MB, en la sección de Publicaciones del portal electrónico del IIUNAM, <http://www.iingen.unam.mx>, desde que se terminó de editar en abril de 2015.