

# **ANÁLISIS TEÓRICO DE CARGAS VIVAS EN EDIFICIOS**

**J ALBERTO SORIANO MARTÍNEZ \***  
**SONIA E RUIZ GÓMEZ \*\***

**\* Becario, Instituto de Ingeniería, UNAM**

**\*\* Investigadora, Instituto de Ingeniería, UNAM**

<b>RESUMEN</b>	iv
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>1. TIPOS DE CARGAS (acciones)</b>	3
<i>1.1 Acciones permanentes</i>	3
<i>1.2 Acciones variables</i>	4
<i>1.3 Acciones accidentales</i>	4
<i>1.4 Intensidades nominales de cargas</i>	4
<b>2. MODELOS ESTOCÁSTICOS DE CARGAS VIVAS</b>	17
<i>2.1 Representación de las cargas vivas como procesos estocásticos</i>	18
<b>3. MODELO DE SIMULACIÓN MONTE CARLO</b>	27
<i>3.1 Carga total máxima</i>	28
<i>3.2 Aplicación del modelo de simulación Monte Carlo</i>	31
<b>4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SIMULACIÓN</b>	33
<b>5. RESULTADOS EMPLEANDO EL PROCEDIMIENTO DE CHALK Y COROTIS</b>	35
<b>6. CARGAS VIVAS NOMINALES EN LOS REGLAMENTOS ANSI A58.1 1994 Y RCDF 1993</b>	41
<b>7. CONCLUSIONES</b>	43
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	45

## **ABSTRACT**

Several mathematical models that represent the stochastic action of live loads are reviewed. A computer program based on the Monte Carlo simulation technique is applied to illustrate a systematic approach to the problem. Some probability functions of the maximum total loads obtained with the simulation model are compared with those based on exact mathematical formulations.

The probabilities of exceedance of the nominal loads proposed in the Mexican Regulations of the Federal District (RCDF-1993), and in the American Norm ANSI A58.1-1994 are analyzed. Those probabilities of exceedance are based on data obtained from several countries. The necessity of obtaining Mexican statistical information on live loads is stated.

## RESUMEN

Se revisan algunos modelos matemáticos que se han propuesto en la literatura para representar los efectos que tienen las cargas vivas que actúan sobre los pisos de los edificios. Se sistematiza un procedimiento basado en el método Monte Carlo y se ilustra su aplicación empleando un programa de cómputo desarrollado especialmente para este fin. Algunas funciones de probabilidad de las cargas máximas totales obtenidas con el modelo de simulación se comparan con modelos basados en formulaciones matemáticas exactas.

Se comparan las probabilidades de excedencia de las cargas nominales especificadas en el *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal* (RCDF-1993) y en las normas establecidas por el *Instituto Nacional Americano de Normas* (ANSI A58.1-1994), para edificios con distintos tipo de uso. Dichas probabilidades de excedencia se calculan a partir de datos estadísticos de cargas vivas obtenidos en diversos países. Se plantea la necesidad de obtener información estadística de cargas vivas en México.

## INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos se han construido edificaciones que han permitido a la humanidad resolver problemas de comunicación (puentes, carreteras), vivienda y alimentos (silos de almacenamiento), afrontando problemas ambientales, topográficos e hidrológicos. Sin embargo, la construcción de estas estructuras se hacía más bien de forma empírica, producto de la observación prolongada de diversos fenómenos físicos y naturales. En esa época, la estructuración de las obras era fundamentalmente un arte. A partir del siglo XVIII, cuando se contaba ya con algunos principios de la estática, así como de las propiedades físicas de algunos materiales de construcción, se inició el análisis y diseño estructural científico, que se utilizó para resolver problemas de vigas y armaduras simples; posteriormente se desarrolló el resto de la teoría de estructuras determinadas e indeterminadas, consolidando a la ingeniería estructural como una ciencia sustentada en las leyes de la física y las matemáticas (entre estas, la probabilidad y la estadística). *El uso de métodos científicos en el diseño de estructuras, implica primeramente un conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, así como de las cargas externas que actúan en la estructura (Ghiocel y Lungu, 1975).* Por otro lado, el diseño de una estructura debe satisfacer los siguientes criterios: *a) seguridad (confiabilidad), b) servicio, c) durabilidad, d) estética y e) economía.* Esto significa, funcionalidad y factores estéticos, así como técnicos y económicos. La seguridad y economía de los edificios requiere el conocimiento de las cargas a las que estará sujeta una estructura durante su vida útil. Si bien la magnitud y duración de las cargas no se puede conocer con absoluta certeza, es posible formular modelos probabilistas que reflejen la naturaleza estocástica de ellas. La metodología y los resultados que se presentan en este trabajo son el producto de un análisis racional del proceso que siguen las cargas vivas que actúan en las edificaciones.

## 1. TIPOS DE CARGAS (acciones)

Para fines de diseño, generalmente se proporciona un sistema de cargas y/o deformaciones el cual se supone es equivalente a las solicitaciones que se espera se presenten en una estructura real. Estas pueden ser cargas gravitacionales o accidentales. En el diseño de una estructura se debe considerar el efecto combinado de todas las acciones que tengan cierta probabilidad de actuar sobre dicha estructura.

Las acciones pueden ser de tres categorías (CFE, 1981).

### 1.1 Acciones permanentes

Son aquellas que obran en forma continua sobre la estructura y cuya intensidad puede considerarse que no varía en el tiempo. Comprenden:

- a) *Carga muerta*. Incluye tanto el peso propio de los elementos estructurales como el peso de instalaciones y equipo que ocupen una posición fija y permanente en la construcción, así como el peso estimado de los elementos que posteriormente puedan colocarse en forma permanente.
- b) *Empuje estático de tierras, granos y líquidos*
- c) *Deformación y desplazamiento impuestos a la estructura*. Tales como los debidos a presfuerzo o a movimientos diferenciales permanentes en los apoyos.

### ***1.2 Acciones variables***

Son las que actúan en una estructura con una intensidad variable en el tiempo. Comprenden:

a) *Carga viva*. Representa las fuerzas gravitacionales que obran en la construcción y que no tienen carácter permanente.

b) *Efectos causados en la estructura por cambios de temperatura y contracciones*

c) *Deformaciones impuestas y hundimientos diferenciales que tengan una intensidad variable en el tiempo*

d) *Efectos de operación de maquinaria y equipo*. Incluyendo, cuando sean significativas, las acciones dinámicas que el funcionamiento de máquinas induzca en las estructuras debido a las acciones accidentales.

### ***1.3 Acciones accidentales***

Estas no se deben al funcionamiento propio de la construcción. Pueden alcanzar valores significativos solo durante lapsos breves de tiempo. Incluyen:

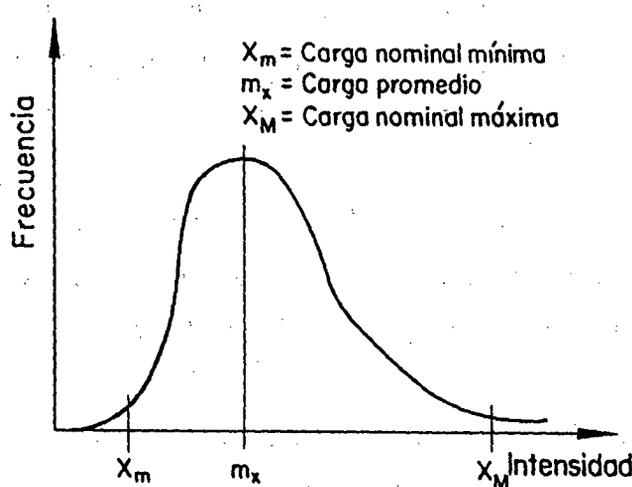
- Sismo
- Viento
- Cargas de montaje
- Otras acciones accidentales, como nieve, explosiones, incendios y otros agentes que pueden ocurrir en casos extraordinarios.

### ***1.4 Intensidades nominales de cargas***

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF 1976, 1987, 1993) clasifica las acciones de acuerdo con la duración con que obran sobre la estructura con su intensidad máxima.

En el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal las acciones se clasifican en permanentes, variables y accidentales. Los criterios generales de determinación de estas acciones son los siguientes.

Las acciones permanentes y variables tienen distribuciones de frecuencia como la indicada en forma aproximada en la figura 1.1. Se han señalado en ella tres valores de las intensidades de las acciones:



**Fig 1.1 Distribución de frecuencias**

- a) Una *intensidad nominal máxima*,  $X_M$ , cuya probabilidad de ser excedida es pequeña (por ejemplo, dos por ciento), o sea, que corresponde a un *valor máximo probable* de la carga.
- b) Una *intensidad nominal mínima*,  $X_m$ , cuya probabilidad de no ser alcanzada es pequeña (por ejemplo, dos por ciento), es decir, que corresponde a un *valor mínimo probable* de la carga.
- c) La *intensidad nominal mediana*,  $m_x$ , que corresponde a una probabilidad de excedencia de cincuenta por ciento.

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal utiliza estos conceptos de intensidad máxima e intensidad mínima para establecer las acciones de diseño

permanentes y variables. En el caso de las permanentes, establece determinar un valor máximo probable de su intensidad tomando en cuenta la variabilidad de las dimensiones de los elementos, de los pesos volumétricos y de las otras propiedades relevantes de los materiales, excepto cuando el efecto de la acción permanente sea favorable a la estabilidad de la estructura, como en muros de gravedad; entonces debe usarse la intensidad mínima probable.

La carga viva está especificada comúnmente en los reglamentos de construcción como carga uniformemente repartida equivalente, con distintas intensidades de acuerdo con el uso considerado. Para acciones variables se establecen cuatro intensidades:

- a) Una *intensidad máxima probable* ( $W_m$ ) que se determina como el valor máximo probable durante la vida esperada de la construcción. Se emplea en combinación con acciones permanentes y es la designada por  $X_M$  en la fig 1.1.
- b) Una *intensidad mínima probable*, que debe utilizarse cuando el efecto de la acción sea favorable a la estabilidad de la estructura; es la equivalente a  $X_m$  en la fig 1.1, pero el Reglamento (RCDF) especifica tomarla en general igual a cero.
- c) Una *intensidad media* ( $w$ ), que se utiliza para estimar efectos a largo plazo, como hundimientos o deflexiones.
- d) Una *intensidad instantánea* ( $W_a$ ) que se utiliza en combinaciones que incluyan acciones accidentales o más de una acción variable. Es el valor máximo probable en el lapso en que pueda presentarse una acción accidental como el sismo. Tiene valores comprendidos entre la intensidad media  $m_x$ , y la intensidad máxima  $X_M$ , (fig 1.1). Al especificar esta cantidad se reconoce que es muy poco probable que al presentarse una acción accidental la acción variable esté actuando con su intensidad máxima probable.

Al estimar las acciones, es necesario prever las condiciones más desfavorables en las que la estructura puede llegar a encontrarse, así como el tiempo que sufrirá dichas condiciones. Para hacer un análisis riguroso sería necesario conocer las variaciones

probables en la intensidad y la distribución de las cargas a lo largo de la vida útil de la estructura.

Las intensidades adoptadas para el diseño de estructuras y cimentaciones deben ser tales que excedan con cierta probabilidad las combinaciones de cargas nominales alteradas por ciertos factores de carga. Las normas del ANSI A58.1 (ANSI, 1990 y 1994) y RCDF 1987 recomiendan los siguientes criterios de combinación de cargas:

#### 1.4.1 Norma ANSI A58.1, 1990 y 1994

- 1)  $1.4 D$
- 2)  $1.2 D + 1.6 L + 0.5 (Lr \text{ o } S \text{ o } R)$
- 3)  $D + (W \text{ o } E)$
- 4)  $D + L + (Lr \text{ o } S \text{ o } R) + (W \text{ o } E)$

donde

D, carga muerta, corresponde al peso propio de los elementos estructurales (vigas, columnas, losas, muros, etc) y de todos los pesos de los materiales de construcción incorporados a los edificios que en forma permanente serán soportados por los elementos estructurales, incluyendo partes fijas (falsos plafones, muros divisorios, anuncios publicitarios, instalaciones de aire acondicionado, instalaciones eléctricas y sanitarias, etc). Además, deberán considerarse los pesos de equipo permanente.

E, cargas por sismo.

L, carga viva debida a una intensidad de uso y ocupación, incluyendo cargas debidas a objetos móviles y partes movibles y cargas temporales soportadas por la estructura durante el mantenimiento. En el diseño de estructuras que se ven sujetas a cargas vivas alternantes cuyos periodos de vibración ponen en riesgo la estabilidad de la estructura, se deberá considerar el impacto y/o vibraciones producto de las cargas vivas.

Lr, carga viva de azotea.

S, carga por nieve.

R, carga por lluvia (excepto estancamiento).

W, carga por viento.

#### 1.4.2 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, RCDF 1987

- 1)  $(W + W_m)$  1.4  
 $(W + W_m)$  1.5 (en caso de aglomeraciones)
- 2)  $(W + W_a + CS)$  1.1

donde

*Carga muerta (W).* Se consideran como cargas muertas los pesos de todos los elementos constructivos, de los acabados y de todos los elementos que ocupan una posición permanente y tienen un peso que no cambia sustancialmente en el tiempo. Para la evaluación de las cargas muertas se emplearán las dimensiones especificadas de los elementos constructivos y los pesos unitarios de los materiales. Para estos últimos, se utilizarán valores mínimos probables cuando sea más desfavorable para la estabilidad de la estructura considerar una carga muerta menor, como en el caso de volteo, flotación, lastre y succión producida por viento. En otros casos se emplearán valores máximos probables.

*Cargas vivas.* Se consideran cargas vivas las fuerzas que se producen por el uso y ocupación de las construcciones y que no tienen carácter permanente. Las cargas especificadas no incluyen el peso de muros divisorios de mampostería o de otros materiales, ni el de muebles, equipos u objetos de peso fuera de lo común, como cajas fuertes de gran tamaño, archivos importantes, libreros pesados o cortinajes de salas de espectáculos. Cuando se prevean tales cargas deberán cuantificarse y tomarse en cuenta en el diseño en forma independiente de la carga viva especificada.

*Carga viva máxima ( $W_m$ ).* Estas cargas se deberán emplear para diseño estructural por fuerzas gravitacionales y para calcular asentamientos inmediatos en suelos, así como en el diseño estructural de los cimientos ante cargas gravitacionales.

*Carga viva instantánea* ( $W_a$ ). Se deberá usar para diseño sísmico y por viento y cuando se revisen distribuciones de carga más desfavorable que la uniformemente repartida sobre toda el área.

*Carga media* ( $w$ ). Se deberá emplear en el cálculo de asentamientos diferidos y para el cálculo de flechas diferidas.

*Carga sísmica* (CS). Cargas debidas a la acción sísmica.

Cuando el efecto de la carga viva sea favorable para la estabilidad de la estructura, como en problemas de flotación, volteo y succión por viento, su intensidad se considerará como nula sobre toda el área.

#### 1.4.3 Revisión de las cargas vivas de diseño propuestas por el ANSI A58.1 y por el RCDF

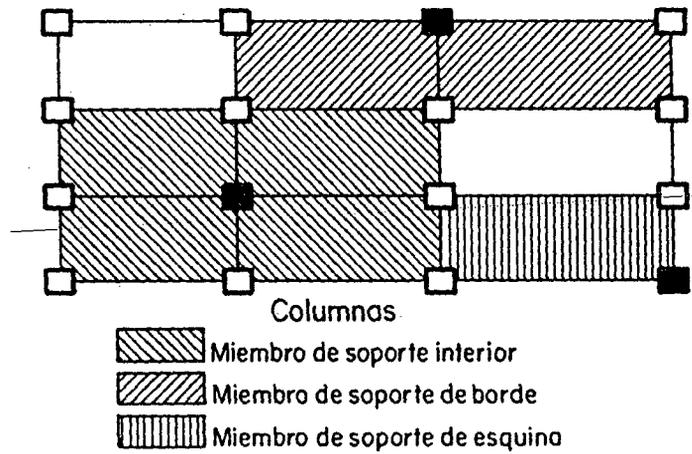
A continuación, se realiza una revisión de las cargas vivas de diseño especificadas tanto en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal RCDF (1976, 1987 y 1993) como en la norma estadounidense ANSI A58.1 (1982 y 1994).

El ANSI A58.1 (1982 y 1994) establece que la carga viva considerada en el diseño de edificios y otras estructuras debe ser el valor máximo probable asociado a una probabilidad de excedencia dada, que sea producida por la intensidad de uso u ocupación, pero en ninguno de los casos deberá ser menor que la mínima carga viva uniformemente distribuida  $L_0$  especificada en la tabla 1.3. Además, el ANSI A58.1 permite una reducción de las cargas vivas  $L_0$  (bajo ciertas limitaciones), en función del área de influencia para áreas mayores que 400 pie<sup>2</sup> (pies cuadrados). Dicha reducción se establece en la fórmula:

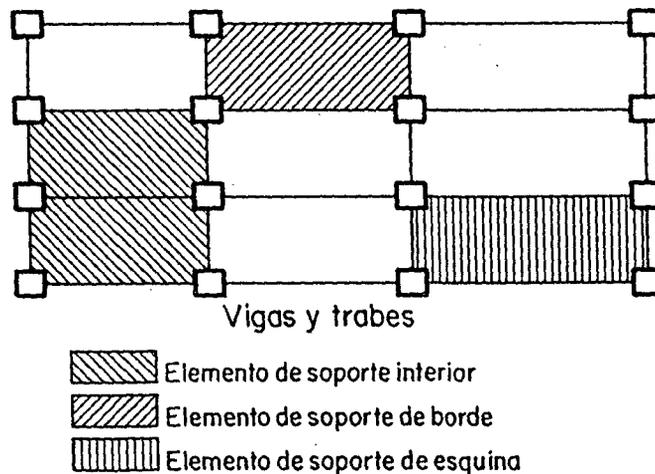
$$L = L_0 \left( 0.25 + \frac{15}{\sqrt{A_1}} \right) \quad (1.1)$$

donde

- $L$  carga viva reducida, por pie cuadrado de área soportada por el miembro estructural
- $L_0$  carga viva de diseño sin reducir, por pie cuadrado de área soportada por el miembro estructural
- $A_I$  área de influencia en pies cuadrados. El área de influencia  $A_I$  es cuatro veces el área tributaria para una columna (fig 1.2); dos veces el área tributaria para una viga (fig 1.3) e igual al área del tablero en el caso de losas de dos direcciones.



*Fig 1.2 Área de influencia en columnas*



*Fig 1.3 Área de influencia en vigas*

La carga viva de diseño no deberá ser menor que el 50 % de la carga viva  $L_0$  propuesta para miembros que soportan un piso, y no menor que el 40 % de la carga viva  $L_0$  para otros casos.

El reglamento mexicano desde sus orígenes (*Rosenblueth, 1959*) empleaba un formato similar (bajo ciertas consideraciones, para elementos de área tributaria mayor de 36 m<sup>2</sup> o 400 pie<sup>2</sup>, etc), al que utiliza el ANSI A58.1 referente a la reducción de las cargas unitarias de diseño y que los reglamentos subsecuentes han utilizado. Este formato se puede resumir en la siguiente expresión

$$W_d = W \left( 1 + \frac{f}{\sqrt{A}} \right) \quad (1.2)$$

Aquí

$W_d$  carga unitaria de diseño, es válida solo cuando la estabilidad del elemento depende completamente de la carga total que obra en el área tributaria  $A$ .

Además, se considera este término en función de una ocupación dada.

$A$  área tributaria que actúa sobre el elemento ya sea columna o viga (ver figs 1.4 y 1.5).

$f$  factor que depende de la vida útil de la estructura.

$W$  media de la carga viva.

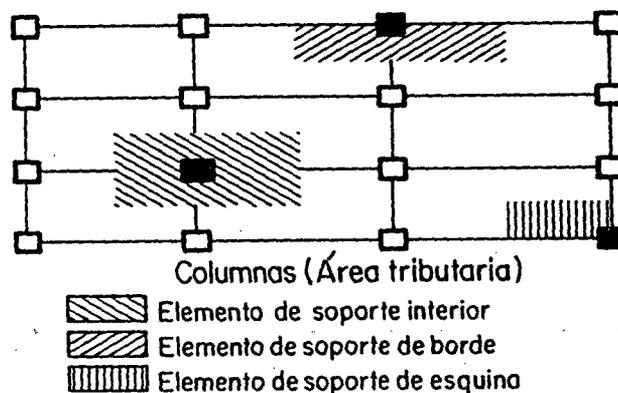
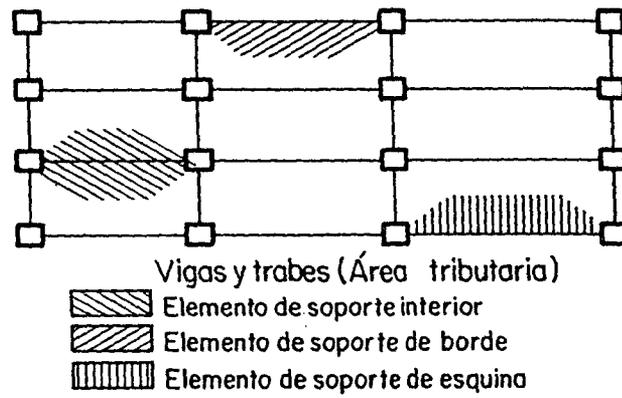
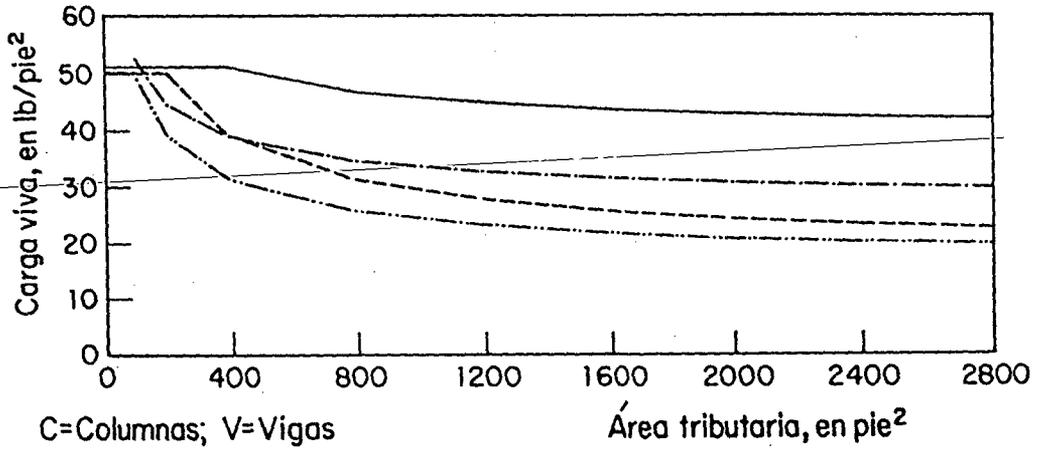


Fig 1.4 Área tributaria en columnas

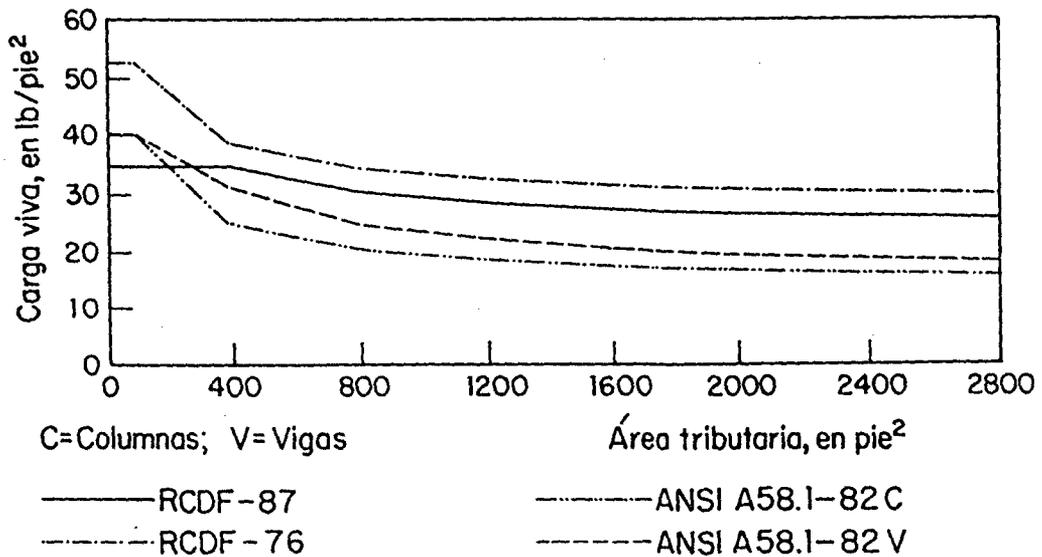


*Fig 1.5 Área tributaria en vigas*

Tanto el reglamento americano como el mexicano consideran una reducción de las cargas de diseño según el área de influencia o el área tributaria. En las figs 1.6 y 1.7 se ilustra lo anterior. Se presentan los casos de cargas vivas en oficinas y en habitaciones.



*Fig 1.6 Variación de cargas vivas en oficinas*



*Fig 1.7 Variación de cargas vivas en habitación*

Cabe aclarar que los resultados que se presentan están en función del área tributaria (el ANSI A58.1 utiliza el área de influencia en lugar del área tributaria). La ordenada de las gráficas corresponde a la carga nominal recomendada por los reglamentos considerados. De acuerdo con los resultados presentados en estas gráficas se puede afirmar que para estos casos y donde se aplica la fórmula de reducción de cargas, la norma mexicana trabaja con valores de cargas vivas mayores que los que propone la norma americana.

En las tablas 1.1 a 1.3 se muestran los valores nominales de cargas vivas que proponen los reglamentos americanos ANSI A58.1 (1982 y 1994), y los reglamentos de Construcciones para el Distrito Federal 1976 y 1987. El reglamento mexicano de 1993 contiene valores de cargas nominales iguales a los de la edición 1987. Las cargas uniformes de las tablas 1.1 y 1.2 se consideran distribuidas sobre el área tributaria de cada elemento.

Con base en la revisión de los valores nominales de cargas vivas que proponen los reglamentos mexicanos de construcción (RCDF) de 1976, 1987 y 1993, y la norma americana ANSI A58.1 de 1982 y 1994, se planteó la necesidad de determinar la probabilidad de excedencia de los valores nominales implícita en dichos reglamentos. En este trabajo, se explica y sistematiza una metodología que sirve de sustento del desarrollo estadístico y analítico que sigue el proceso de generación de cargas vivas. Este estudio utiliza datos estadísticos correspondientes a cargas vivas en edificios de Estados Unidos, Canadá y la Unión Europea.

Se desarrolló un programa de cómputo que emplea un modelo de simulación estocástico de cargas vivas con fundamento en la simulación Monte Carlo. Primero se presentan las bases teóricas de estos modelos; los resultados del programa de simulación se comparan con los valores nominales que proponen ambos reglamentos. Por último, se obtiene la probabilidad de que se excedan las cargas vivas especificadas en el ANSI A58.1 1994 y el RCDF 1976 y 1993 para el caso de oficinas, residencias, cuartos de hotel, comercios y salones de clase.

**Tabla 1.1 Cargas vivas unitarias de diseño**  
(Reglamento de Construcciones del DF, 1976)

Destino del piso o cubierta	w, en kg/m <sup>2</sup>	Wa, en kg/m <sup>2</sup>	Wm, en kg/m <sup>2</sup>
Habitación (casa habitación, departamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, internados de escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares). Oficinas, despachos y laboratorios	70	90	$120 + 420/\sqrt{A}$
Comunicación para peatones (pasillos, escaleras, rampas, vestíbulo y pasaje de acceso libre al público)			
Cuando sirven a no más de 200 m <sup>2</sup> de área habitable	40	150	$150 + 120/\sqrt{A}$
Cuando sirven a un área habitable superior a 200 m <sup>2</sup> e inferior a 400 m <sup>2</sup>	40	150	$150 + 400/\sqrt{A}$
Cuando sirven a 400 m <sup>2</sup> o más de área habitable en un lugar de reunión	40	150	$150 + 600/\sqrt{A}$
Estadios y lugares de reunión sin asientos individuales	40	350	450
Otros lugares de reunión (templos, cines, teatros, gimnasios, salones de baile, restaurantes, bibliotecas, aulas, salas de juego y similares)	40	250	300
Comercios, fábricas y bodegas			
Área tributaria hasta 20 m <sup>2</sup>	0.8 Wm	0.9 Wm	Wm
Área mayor de 20 m <sup>2</sup>	0.7 Wm	0.8 Wm	0.9 Wm
Tanques y cisternas	0.7 Wm	0.8 Wm	Wm
Cubiertas y azoteas con pendiente no mayor de 5 %	15	70	100
Cubiertas y azoteas con pendiente mayor de 5 % y menor de 20 %	5	20	60
Cubiertas y azoteas con cubierta mayor de 20 %	5	20	30
Volados en vía pública (marquesinas, balcones y similares)	15	70	300
Garajes y estacionamientos (para automóviles exclusivamente)	40	100	150
Andamios y cimbras de concreto	15	70	100

**Nota**

Deberán consultarse las observaciones y notas complementarias (RCDF, 1976) para cada tipo de carga especificada anteriormente

**Tabla 1.2 Cargas vivas unitarias de diseño**  
(Reglamento de Construcciones del DF, 1987)

Destino del piso o cubierta	w, en kg/m <sup>2</sup>	Wa, en kg/m <sup>2</sup>	Wm, en kg/m <sup>2</sup>
Habitación (casa habitación, departamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, internados de escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares)	70	90	170 (1) Reducción 100 + 420/√A
Oficinas, despachos y laboratorios	100	180	250 (2) Reducción 180 + 420/√A
Comunicación para peatones (pasillos, escaleras, rampas, vestíbulo y pasaje de acceso libre al público)	40	150	350 (3), (4)
Estadios y lugares de reunión sin asientos individuales	40	350	450 (5)
Otros lugares de reunión (templos, cines, teatros, gimnasios, salones de baile, restaurantes, bibliotecas, aulas, salas de juego y similares)	40	250	350 (5)
Comercios, fábricas y bodegas	0.8 Wm	0.9 Wm	Wm (6)
Cubiertas y azoteas con pendiente no mayor de 5 %	15	70	100 (4,7)
Cubiertas y azoteas con pendiente mayor de 5 % y menor de 20 %	5	20	60 (4,7,8)
Volados en vía pública (marquesinas, balcones y similares)	15	70	300
Garajes y estacionamientos (para automóviles exclusivamente)	40	100	250

**Nota**

Deberán consultarse las observaciones y notas complementarias (RCDF, 1987) para cada tipo de carga especificada anteriormente (i) Ver "observaciones" en el RCDF-1987

**Tabla 1.3 Carga viva mínima uniformemente distribuida,  $L_0$  (ANSI, A58.1, 1982)**

Ocupación o uso	$L_0$ , en $\text{kg/m}^2$	Ocupación o uso	$L_0$ , en $\text{kg/m}^2$
Salas y otros sitios de reunión		Construcciones residenciales	
Con asientos fijos	295	Multifamiliares	
Con asientos móviles	490	Departamentos privados	195
Plataformas y rampas	490	Salas públicas	490
		Corredores	390
Edificios de oficinas		Hoteles	
Oficinas	245	Cuartos de huéspedes	195
Áreas públicas	490	Salones públicos	490
Corredores niveles superiores	390	Corredores o salones públicos	490
(archivos y cuartos de computadora requieren mayores cargas)		Otros corredores	390
Tiendas menudeo		Casa habitación	
Primer nivel	490	Primer nivel	195
Otros niveles	365	Segundo nivel	145
Mayoreo	610		
Bibliotecas		Hospitales	
Salones de lectura	295	Laboratorios y quirófanos	295
Libreros (libros y estantería, $1050 \text{ kg/m}^3$ )	730	Dormitorios y cuartos privados	195
Corredores niveles superiores	390	Corredores niveles superiores	390
Teatros		Corredores	
Pasillos, corredores y vestíbulo	490	En el primer nivel	490
Niveles superiores	295	En otros niveles debe tomarse la misma carga del área habitable	
Escenario	730		
Reclusorios		Bodegas	
Celdas	195	Materiales ligeros	610
Corredores	490	Materiales pesados	1220
Balcones (exteriores)		Fábricas	
Tan solo en casa habitación y con área menor de $10 \text{ m}^2$	295	Manufactura ligera	610
Marquesinas	365	Patios y terrazas para peatones	490
Gimnasios	490	Boliches, albercas y áreas de recreación similares	370
Garajes		Comedores y restaurantes	490
Automóviles de pasajeros	245	Salones de baile	490
Autobuses y trailers (ver AASHTO)			

**Nota**

Deberán consultarse las observaciones y notas complementarias (ANSI, A58.1, 1982) para cada tipo de carga especificada anteriormente

## 2. MODELOS ESTOCÁSTICOS DE CARGAS VIVAS

El desarrollo acelerado de las computadoras ha permitido la simulación de diversos fenómenos físicos que se presentan en las estructuras, y resolver también problemas cada vez más complejos. Actualmente, el mercado se encuentra inundado de programas para el análisis y diseño de estructuras determinadas e indeterminadas, y de otros que simulan los ciclos histeréticos de los materiales; sin embargo, se han encontrado algunas discrepancias entre el comportamiento simulado de las estructuras y las estructuras reales instrumentadas. Por esta razón, en la actualidad, los centros de investigación analizan diversos factores que interactúan con las estructuras con la finalidad de conocer más acerca del comportamiento de los elementos que conforman las estructuras (interacción suelo-estructura, cargas que actúan en las construcciones -permanentes, variables, accidentales-, comportamiento de elementos y materiales de construcción, etc). Aunque difícilmente se podrán predecir en forma exacta los desplazamientos y deformaciones que sufre una estructura, debido a la incertidumbre inherente de los materiales y del mismo proceso constructivo, el ingeniero debe garantizar la seguridad de estas, realizando un diseño racional respaldado en una evaluación cuantitativa de los costos y las consecuencias de falla, así como las distribuciones probabilísticas de los parámetros que rigen el comportamiento estructural y los límites de seguridad.

En muchos de sus campos el diseño estructural ha llegado a una etapa en la que se dificulta el progreso sin recurrir a la teoría de probabilidades y a métodos estadísticos. La seguridad y economía de los edificios requiere un conocimiento de las cargas a las que estará sujeta una estructura durante su vida útil. Si bien la magnitud y duración de las

cargas no se puede conocer con completa certeza, es posible formular modelos probabilistas que reflejen la naturaleza estocástica de estas cargas.

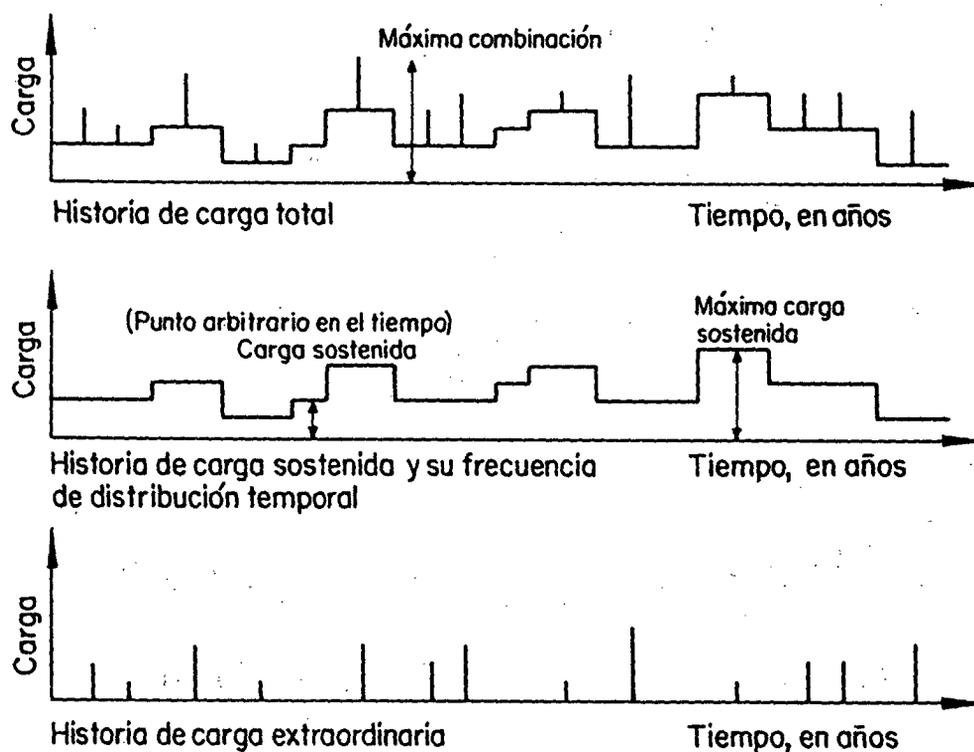
La verdadera naturaleza de las cargas vivas es dinámica, esto es, que varían con el tiempo. De hecho, las cargas vivas en esencia son dinámicas, lo cual implica variación de la magnitud de la carga con el tiempo; sin embargo, para fines de diseño pueden considerarse las cargas vivas como estáticas, debido a que sus fluctuaciones en el tiempo tienen periodos bastante más largos que el periodo de vibración de la estructura (*Rodríguez Cuevas, 1995*). Al considerar lo anterior, se deduce que la mayoría de las estructuras en ingeniería civil pueden diseñarse como si las cargas vivas fueran estáticas; sin embargo, existen importantes excepciones, como es el caso de salones de fiestas, graderías, estadios, puentes y todos aquellos lugares donde existen aglomeraciones, ante las cuales en un momento dado la estructura se ve sujeta a fuerzas alternantes que provocan vibraciones excesivas a la estructura. Por ejemplo, *Ghiocel y Lungu (1975)* han recomendado que cuando existan condiciones de impacto de las cargas vivas, estas deberán incrementarse entre un 20 y 50 % del valor de las cargas estáticas o hasta un 100 % para el caso de elevadores.

La metodología planteada a continuación, es útil para representar la descripción probabilista de las cargas vivas cuando la frecuencia de aplicación de estas sobre la estructura es muy diferente de sus periodos naturales de vibración.

## **2.1 Representación de las cargas vivas como procesos estocásticos**

La variación que sufren en el tiempo las cargas vivas en un área de piso dado, durante la vida útil de los edificios, puede representarse mediante modelos matemáticos que tomen en cuenta su aleatoriedad en el tiempo.

El modelo más comúnmente usado para representar los procesos de carga en los pisos supone *cargas sostenidas* (asociado normalmente con el uso proyectado de un espacio), más *cargas extraordinarias* que representan eventos inusuales de sobrecarga (fig 2.1).



**Fig 2.1 Tipos de cargas vivas**

### 2.1.1 Carga sostenida: *valor en un instante cualquiera*

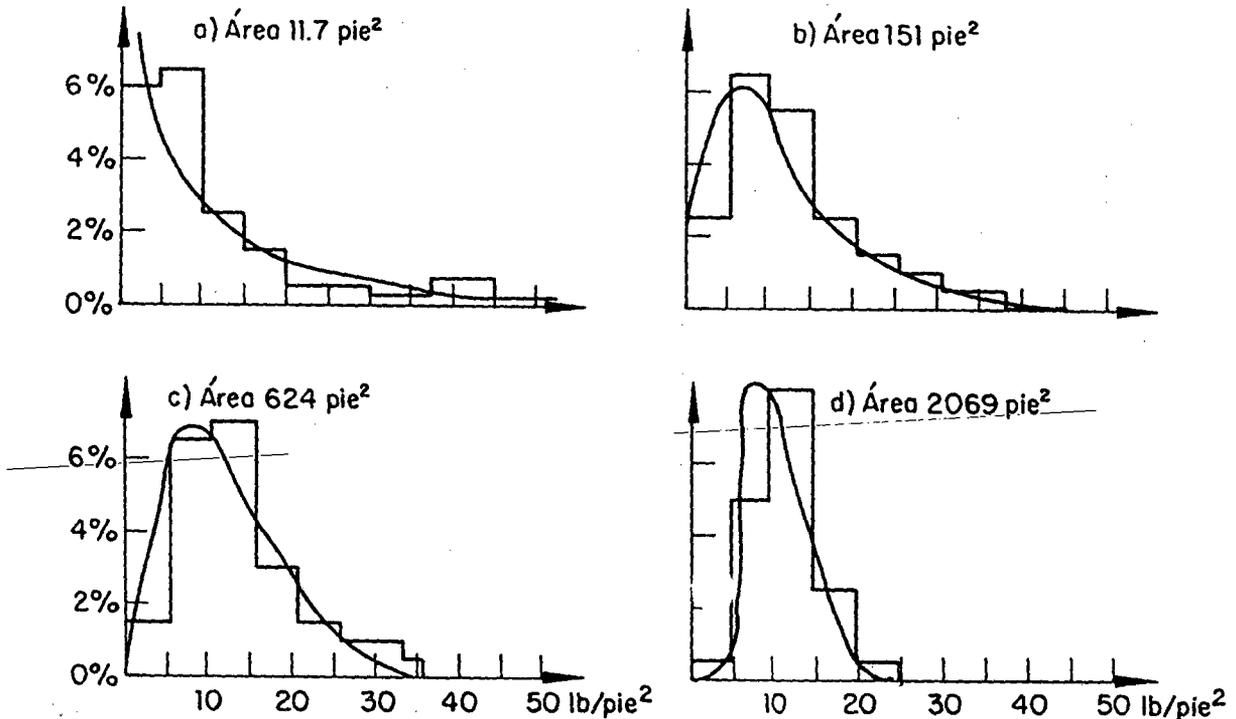
La carga sostenida  $u$ , es la que se conoce como carga viva de servicio de un edificio y se expresa en unidades de carga por unidad de área. Una revisión intensiva de datos ha sugerido el uso de una función de distribución de probabilidad gamma para su magnitud (fig 2.2).

A continuación, se mencionan algunos modelos de cargas vivas sostenidas propuestos por varios autores, que muestran la variación de las cargas vivas de servicio en función del área de influencia.

Los modelos de cargas vivas consideran que la intensidad de las cargas que se presentan en los edificios actúan en un área de piso de forma aleatoria. Para *Ellingwood y Culver (1977)* la media es independiente del área de piso  $A$ , pero la varianza no. Esto es

$$E(u) = m_u ; \quad \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2}$$

$$\text{Var}(u) = \sigma_a^2 + \frac{\sigma_s^2}{A} ; \quad \left( \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2} \right)^2$$



**Fig 2.2** Distribución de frecuencias de la intensidad de carga, suponiendo el modelo con distribución Gamma (Peir y Cornell, 1973)

Los valores de  $m_u$ ,  $\sigma_a^2$  y  $\sigma_s^2$  se determinan experimentalmente a partir de datos de cargas vivas de servicio;  $m_u$  representa el valor medio de la carga viva de servicio;  $\sigma_a^2$  es la varianza de la carga (esta es función de un área de piso).  $\sigma_s^2$  es una constante experimental que resulta de una selección o de un ajuste razonable de datos de áreas de servicio pequeñas.

Cuando la carga real sostenida no es uniforme sobre un área de piso dada, 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 carga instantánea sostenida puede equivaler a una carga instantánea uniformemente distribuida  $L$ . Esta última tiene los siguientes parámetros, según *Ellingwood y Culver* (1977)

$$E(L) = m_u = m_L ; \quad \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2}$$

$$\text{Var}(L) = \sigma_a^2 + \frac{K \sigma_s^2}{A} ; \quad \left( \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2} \right)^2$$

Donde  $K$  está en función de una superficie particular de influencia. Al usar una aproximación polinomial para las superficies de influencia se sugirió (*Ellingwood y Culver*, 1977) que un valor de  $K = 2.2$  (que corresponde a los efectos de carga de una columna) es suficientemente exacto para diseño.

Con base en datos estadísticos de oficinas proporcionados por *Ellingwood y Culver* (1977) y por *McGuire y Cornell* (1974), *Harris, Corotis y Bova* (1981) propusieron expresiones para la media  $E(L)$  y varianza  $\text{Var}(L)$  de las cargas sostenidas. Estas son las siguientes

$$E(L) = 11.6 ; \quad \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2} \quad (2.1)$$

$$\text{Var}(L) = 26.2 + \frac{14300}{A} ; \quad \left( \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2} \right)^2$$

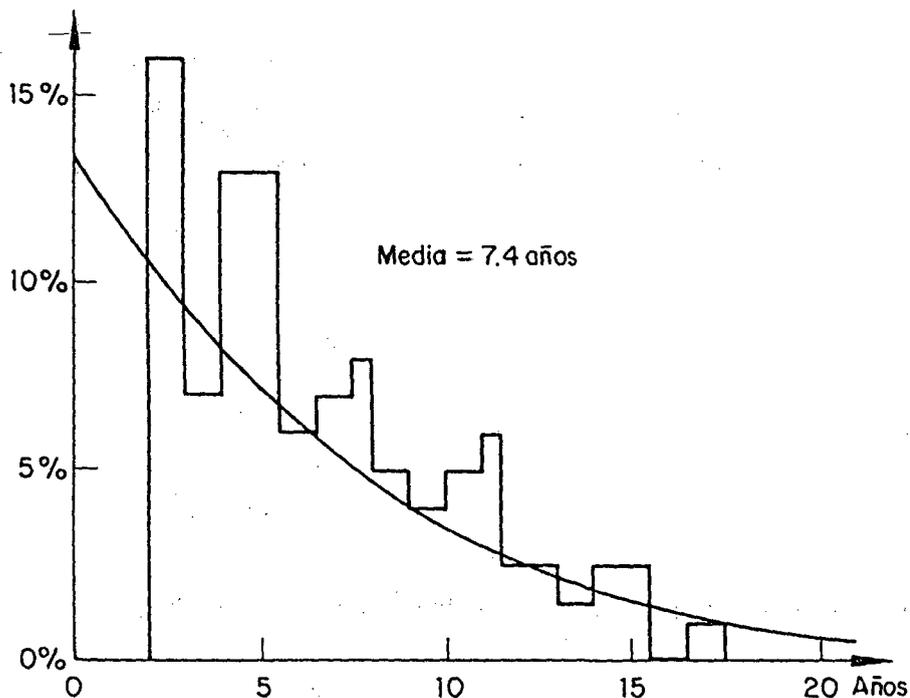
Con los datos proporcionados por *Ellingwood y Culver* (1977)

$$E(L) = 11.8 ; \quad \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2} \quad (2.2)$$

$$\text{Var}(L) = 20.25 + \frac{18106}{A} ; \quad \left( \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2} \right)^2$$

### 2.1.2 Carga sostenida: *valor máximo*

En los siguientes párrafos se trata la descripción probabilista de la carga sostenida máxima durante un lapso de la vida útil de la construcción. Esta formulación se basa en suponer que la carga sostenida es constante dentro de un intervalo de tiempo hasta que ocurre un cambio de ocupación. La suposición de independencia entre áreas cargadas no es estrictamente válida si solo una parte del área experimenta un cambio de ocupación; sin embargo, este modelo simple (*one-tenant*) propuesto por *McGuire y Cornell (1974)* y *Ellingwood y Culver (1977)*, ha demostrado según estos autores que es suficientemente aproximado para fines de diseño. El modelo considera que los cambios de ocupación siguen un proceso de Poisson, por lo que el tiempo de espera entre cambios sigue una distribución exponencial (fig 2.3).



**Fig 2.3** Distribución de las frecuencias por tiempos entre los cambios de ocupación, observado y modelado (Peir y Cornell, 1973)

La función aproximada acumulativa de los valores máximos  $FL_s(I)$  se expresa como (Peir y Cornell, 1973)

$$FL_s(I) = F_L(I) e^{-v_s T F_L(I)(1-F_L(I))} \quad (2.3)$$

Donde  $F_L(I)$  es la función acumulativa de la carga instantánea sostenida. El parámetro  $v_s$  es la tasa promedio de la rapidez de cambios de ocupación y  $T$  el periodo de interés. Para niveles acumulativos altos la ec 2.3 puede aproximarse por (McGuire y Cornell, 1974).

$$FL_s(I) = e^{-v_s T (1-F_L(I))} \quad (2.4)$$

Mediante integración numérica y utilizando la función de densidad de probabilidades  $fL_s(I)$ , que es la derivada de la ec 2.4, puede determinarse la media y la varianza de la carga sostenida máxima.

Ellingwood y Culver (1977) evaluaron la ec 2.4 usando dos puntos diferentes y suponiendo una distribución Extrema Tipo I, con niveles acumulativos de  $F_L(I)$  de 0.99 y 0.999. Supusieron  $F_L(I)$  asociada a una distribución gamma. McGuire y Cornell (1974), siguieron el mismo procedimiento pero usaron la ec 2.3 y niveles acumulativos de 0.9 y 0.99.

### 2.1.3 Carga extraordinaria instantánea

El modelo para cargas extraordinarias se representa a través de eventos de ocurrencia independiente de Poisson. Durante cada evento se supone que la gente se reúne en grupos. El número de cada uno es un proceso de Poisson con media que depende del área, designada por  $\lambda$ . Este modelo fue adoptado por McGuire y Cornell (1974) y Ellingwood y Culver (1977).

La media y la varianza de un evento simple extraordinario  $E$ , expresadas en unidades de carga por unidad de área, están dadas por McGuire y Cornell (1974).

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

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

Donde  $k$  convierte la carga a un valor de carga equivalente uniformemente distribuida y  $A$  es el área total. Los términos  $m_W$ ,  $\sigma_W$ ,  $m_R$ ,  $\sigma_R$  representan la media y la desviación estándar; el subíndice  $W$  se refiere al peso de una persona y  $R$  es el número de personas en un grupo.

#### 2.1.4 Carga extraordinaria: valor máximo

La función de densidad de probabilidad de la magnitud de un evento extraordinario se supone tipo gamma (McGuire y Cornell, 1974) y las características de la carga máxima extraordinaria para uno de dichos eventos durante un lapso dado pueden obtenerse aproximadamente con una relación análoga a las ecs 2.3 o 2.4.

De acuerdo con la teoría de probabilidades, al considerar que  $F_L(I)$  tiene una función de distribución de probabilidades tipo gamma, el valor medio del máximo  $\mu_{X_m}$  y la desviación estándar  $\sigma_{X_m}$  están dadas por Soriano (1996)

$$\mu_{X_m} = \int_0^{\infty} x N FL_s(x) f_L(x) dx \quad (2.7)$$

$$\sigma_{X_m} = \sqrt{\int_0^{\infty} x^2 N FL_s(x) f_L(x) dx - (\mu_{X_m})^2} \quad (2.8)$$

donde

$x$  es la carga viva máxima en un instante cualquiera

$N = v_s T$

$v_s$  índice medio de cambios de carga (unidades/año)

$T$  periodo, en años

$FL_s(x)$  función de distribución de probabilidades acumulada

$f_L(x) = d FL(x) / dx$

$f_L(x)$  función de densidad de probabilidades gamma.

Una forma alternativa a las ecs 2.7 y 2.8, recurre al criterio aproximado desarrollado por *Yi-Kwei Wen* (1977). La media  $\mu_{X_m}$  y la desviación estándar  $\sigma_{X_m}$  del máximo de  $N$  repeticiones independientes, con distribución de variables aleatorias gamma, se considera dada por

$$\mu_{X_m} = \mu_X + p \sigma_X \quad (2.9)$$

$$\sigma_{X_m} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \sigma_X C_2 \quad (2.10)$$

donde

$\mu_X$  media de la intensidad de la carga (peso / área)

$\sigma_X$  desviación estándar de la intensidad de carga (peso / área)

$$p = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln N + 0.5772 \frac{1 + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln N \frac{\sigma_X}{\mu_X}}{2 \frac{\sigma_X}{\mu_X} + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln N} \quad (2.11)$$

$$p = C_1 + 0.5772 C_2$$

$$C_2 = \frac{1 + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln N \frac{\sigma_X}{\mu_X}}{2 \frac{\sigma_X}{\mu_X} + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln N} \quad (2.12)$$

El empleo de las ecs 2.9 a 2.12 da lugar a resultados conservadores del orden del 10 % por arriba de los valores reales calculados mediante la ec 2.7.

Posteriormente, el mismo autor propuso en 1979, la siguiente expresión en lugar de la 2.11

$$p = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln N \left( 1 + 0.1 \left( \frac{\sigma_X}{\mu_X} \right)^3 \right) \quad (2.13)$$

donde  $\mu_X$  y  $\sigma_X$  ya han sido definidas. *Wen* (1979) mostró que las ecs 2.9 y 2.13 dan resultados tan exactos que solo difieren en 1 % de los que se obtienen con la 2.7.

### 3. MODELO DE SIMULACIÓN MONTE CARLO

Mediante las fórmulas aproximadas de *Yi-Kwei Wen* (1979) y la función de distribución Extrema Tipo I, se puede simular el proceso de las cargas vivas extraordinarias y sostenidas. Dicho proceso de simulación de cargas vivas por el método Monte Carlo se resume a continuación.

1. Primero se generan intervalos de tiempo  $t_i$  durante el periodo ( $T$ ) deseado entre cambios de carga sostenida, empleando la función de distribución exponencial.
2. Se genera en cada simulación la magnitud de la carga sostenida en un punto arbitrario en el tiempo, suponiendo una función de distribución gamma.
3. Mediante una función de distribución Extrema Tipo I y las fórmulas aproximadas de *Yi-Kwei Wen* (1979), (ecs 2.9 y 2.10), se generan magnitudes de carga viva extraordinaria máxima.
4. Se suman las cargas sostenidas instantáneas más las extraordinarias máximas.
5. Se encuentra la máxima combinación durante los ( $t_i$ ) eventos que se presentan durante la vida útil de la estructura ( $T$ ).
6. Se elige la combinación más grande.

7. Se repiten los pasos 1 a 6, un número suficiente de veces.
8. Se obtiene el valor medio y la desviación estándar de los  $n$  procesos de simulación.

El modelo de simulación aquí expuesto muestra de manera directa diferentes combinaciones de cargas vivas durante cada paso de simulación. A partir de estas se obtiene la combinación de valores máximos que pueden ocurrir en cierto lapso (Esteva, 1994). La carga viva total máxima está gobernada por una función de distribución Extrema Tipo I.

### 3.1 Carga total máxima

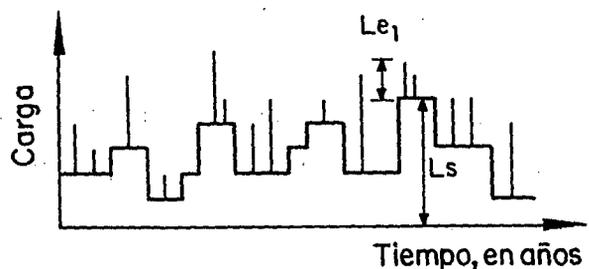
Chalk y Corotis (1980) indican que es probable que la carga viva máxima total durante el tiempo de vida de una estructura se origine a partir de la combinación de los tres casos siguientes.

#### Primer caso (I)

$$L_s + Le_1$$

donde  $L_s$  carga sostenida máxima durante la vida útil de la estructura

$Le_1$  evento extraordinario más grande durante la máxima carga sostenida.

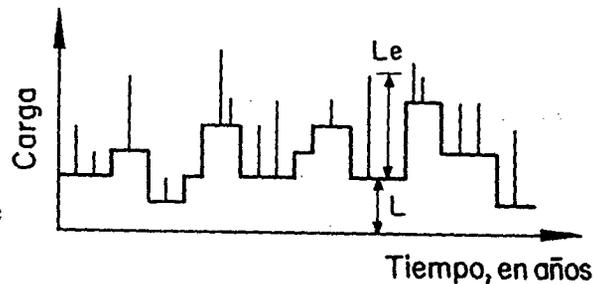


**Segundo caso (II)**

$$Le + L$$

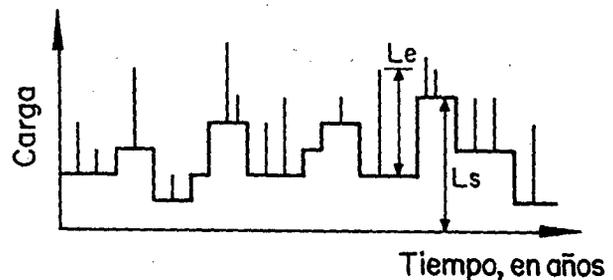
donde  $Le$  carga extraordinaria más grande en la vida útil

$L$  carga sostenida instantánea que actúa al mismo tiempo que la anteriormente definida.

**Tercer caso (III)**

$$Le + Ls$$

donde  $Ls$  y  $Le$  ya han sido definidas.



El modelo de simulación aquí empleado considera de forma implícita la ocurrencia de estos tres casos.

**3.1.1 Un modelo teórico de la carga total máxima**

Un modelo teórico de cargas totales fue propuesto por *Chalk y Corotis* (1980). Estos autores combinan los tres casos de carga viva máxima mencionados anteriormente. Proponen que la función acumulada de la carga total máxima se estime mediante la expresión

$$F_{LT} = e^{-e^{-W_1}} e^{-e^{-W_2}} \left[ \frac{T - E(\tau)}{T} \right] + e^{-e^{-W_3}} \left[ \frac{E(\tau)}{T} \right] \quad (3.1)$$

donde

$L_T$  carga total máxima durante la vida útil

$E(\tau)$  duración promedio de la carga sostenida (por ejemplo, cada ocho años para oficinas)

$T$  vida útil de la estructura

$[(T - E(\tau)) / T]$  probabilidad de que el caso I y II ocurran, pero el caso III no  
 $[E(\tau) / T]$  probabilidad de que se presente el caso III

$$W_i = \alpha_i(Y - u_i)$$

donde

$\alpha_i$  y  $u_i$  son los parámetros correspondientes al caso  $i$ . Estos se asocian a la función Extrema Tipo I

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

donde el término  $[-\alpha(Y-u)]$  se presenta como  $W_1, W_2, W_3$  en la ec 3.1 y son formas variadas reducidas de los casos I, II, III.

$$W_1 = [-\alpha_1(Y - u_1)]$$

$$W_2 = [-\alpha_2(Y - (u_2 + m_L))]$$

$$W_3 = [-\alpha_3(Y - u_3)]$$

donde  $m_L$  representa el valor medio de la carga viva sostenida.

La media y la varianza de estos casos se obtiene como

*Caso I*

$$m_I = E(Ls + Le_1) = m_{Ls} + m_{Le_1}$$

$$\sigma_I^2 = (Var(Ls + Le_1)) = \sigma_{Ls}^2 + \sigma_{Le_1}^2$$

*Caso II*

$$m_{II} = m_{Le}$$

$$\sigma_{II}^2 = \sigma_{Le}^2$$

*Caso III*

$$m_{III} = E(Ls + Le) = m_{Ls} + m_{Le}$$

$$\sigma_{III}^2 = (Var(Ls + Le)) = \sigma_{Ls}^2 + \sigma_{Le}^2$$

por último, se sustituyen la media y la desviación estándar para cada caso. Los valores de los parámetros  $\alpha_i$  y  $u_i$  están dados por

$$\alpha_i = \frac{1.282}{\sigma_i}$$

$$u_i = m_i - \frac{0.577}{\alpha_i}$$

En adelante (tablas 5.1 y 5.2, figs 5.1 a 5.7) se llamará al modelo propuesto por *Chalk* y *Corotis* que emplea las fórmulas aproximadas de *Wen* como modelo de CHALK, y al que emplea las fórmulas mejoradas de *Wen* se denominará CHALK MEJORADA (*Soriano*, 1996).

### 3.2 Aplicación del modelo de simulación Monte Carlo

En el presente estudio se desarrolló un programa de cómputo en lenguaje FORTRAN que utiliza el modelo de simulación Monte Carlo, explicado en la sección anterior. Los datos de entrada al programa empleados para los cálculos correspondientes a ambos reglamentos fueron publicados por *Chalk* y *Corotis* (1980). Ellos presentan un resumen de datos estadísticos de cargas instantáneas sostenidas y extraordinarias, así como índices medios de cambios de ocupación, obtenidos en varios países. Dicho resumen se presenta en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Parámetros de lectura para la simulación

Ocupación o uso	T	$V_s$	$\mu_{Ls}$	$\sigma_{Ls}$	$V_{ex}$	$\mu_{ex}$	$\sigma_{ex}$
Oficinas	50	0.125	10.9	7.6	1.0	8.0	8.2
Hotel	50	0.200	4.5	1.5	20.0	6.0	5.8
Residencia ocupada por el dueño	50	0.100	6.0	3.4	1.0	6.0	6.6
Residencia rentada	50	0.500	6.0	3.4	1.0	6.0	6.6
Comercio, pisos inferiores	50	0.500	17.9	5.6	4.0	10.4	5.1
Comercio, pisos superiores	50	0.500	12.0	10.6	4.0	6.9	3.4
Salón de clases	100	1.000	12.0	3.0	1.0	6.9	3.4

donde  $v_s$  índice medio de cambios de ocupación de las cargas sostenidas (1/año)

$\mu_{Ls}$  valor medio de la carga viva sostenida (lb/pie<sup>2</sup>)

$\sigma_{Ls}$  desviación estándar de la carga viva sostenida (lb/pie<sup>2</sup>)

$v_{ex}$  índice medio de cambios de ocupación de las cargas extraordinarias (1/año)

$\mu_{ex}$  valor medio de la carga viva extraordinaria (lb/pie<sup>2</sup>)

$\sigma_{ex}$  desviación estándar de la carga viva extraordinaria (lb/pie<sup>2</sup>)

$T$  periodo de retorno (años)

1 lb/pie<sup>2</sup> (psf) = 4.8825 kg/m<sup>2</sup>

Los datos presentados en la tabla 3.1 corresponden a un área de referencia de 200 pie<sup>2</sup>, exceptuando el área de uso comercial y salón de clase donde se tomó como referencia un área de 1000 pie<sup>2</sup> (Chalk y Corotis, 1980).

#### 4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SIMULACIÓN

Los resultados de la simulación (se aplicaron los datos de la tabla 3.1) se presentan en la tablas 4.1 y 4.2. En estas se especifican el valor medio y la desviación estándar de la carga total máxima para un lapso de 50 años (excepto el correspondiente a salones de clase que es para 100 años), así como los parámetros  $\alpha$  y  $u$  correspondientes a una función de distribución Extrema Tipo I, donde  $u$  es la moda de la distribución y  $\alpha$  una medida de la dispersión. La tabla 4.1 corresponde a los resultados de la simulación que se obtienen con la fórmula aproximada de *Wen* (1977), y en la tabla 4.2 se presentan los resultados que se obtienen aplicando la fórmula mejorada de *Wen* (1979).

**Tabla 4.1 Resultados de la simulación de cargas vivas**

Ocupación o uso	Fórmula aproximada de Wen (1977)			
	$\mu_{xm}$	$\sigma_{xm}$	$\alpha$	$u$
Oficinas	50.240	9.950	0.1290	45.7570
Hotel	44.883	5.804	0.2210	42.2710
Residencia ocupada por el dueño	35.338	6.650	0.1930	32.3450
Residencia rentada	33.324	5.725	0.2240	30.7470
Comercio, pisos inferiores	68.994	236.500	0.0054	- 37.4390
Comercio, pisos superiores	63.586	139.000	0.0092	- 1.0841
Salón de clases	192.954	1,572.000	0.0008	- 514.6000

**Tabla 4.2 Resultados de la simulación de cargas vivas**

Ocupación o uso	Fórmula mejorada de Wen (1979)			
	$\mu_{xm}$	$\sigma_{xm}$	$\alpha$	$u$
Oficinas	49.082	10.356	0.124	44.421
Hotel	44.463	6.269	0.205	41.641
Residencia ocupada por el dueño	32.037	5.965	0.215	29.352
Residencia rentada	34.789	7.051	0.182	31.615
Comercio, pisos inferiores	52.182	5.718	0.224	49.608
Comercio, pisos superiores	54.240	12.862	0.100	48.451
Salón de clases	36.874	5.595	0.229	34.356

De la magnitud de la desviación estándar que se presenta en la tabla 4.1, se puede concluir que al aplicar la fórmula *aproximada de Wen* el modelo de simulación da resultados poco-satisfactorios. Se constató que los parámetros de la función Extrema Tipo I que da lugar a los valores de media y desviación estándar no cumplen con las condiciones iniciales de una función Extrema Tipo I: en este caso los valores de  $u$  son menores que cero. Estos parámetros no tienen ningún significado físico.

Al emplear la fórmula mejorada de *Wen* (tabla 4.2) se observa que los resultados son satisfactorios. Se puede notar que para este caso la magnitud de la desviación estándar presenta un valor razonable.

Lo anterior hace ver que los resultados que se obtuvieron con la fórmula mejorada de *Wen* son adecuados; en adelante serán los únicos que se tomen en consideración.

## 5. RESULTADOS EMPLEANDO EL PROCEDIMIENTO DE CHALK Y COROTIS

Si se sigue el método de combinación de cargas propuesto por *Chalk* y *Corotis* (1980), explicado en el inciso 3.1.1, y los datos de la tabla 3.1 se obtienen los resultados de las tablas 5.1 y 5.2.

**Tabla 5.1 Carga total máxima(Chalk)**  
(fórmula aproximada de Wen)

Ocupación o uso	$L_s$		$L_e$		$L_{e_1}$		$E_T[ ]$
	$m_{L_s}$	$\sigma_{L_s}$	$m_{L_e}$	$\sigma_{L_e}$	$m_{L_{e_1}}$	$\sigma_{L_{e_1}}$	
Oficinas	24.86	6.89	36.84	8.51	24.73	7.63	55.00
Hotel	7.76	1.25	40.08	6.31	29.54	6.02	45.80
Residencia ocupada por el dueño	15.84	2.90	29.29	7.02	11.78	4.93	36.50
Residencia rentada	11.67	3.12	29.29	7.02	20.69	6.30	38.50
Comercio, pisos inferiores	33.80	4.09	33.21	3.87	20.70	4.51	56.00
Comercio, pisos superiores	43.21	10.23	22.11	2.59	13.77	3.01	57.40
Salón de clases	23.57	1.78	20.30	2.64	8.89	4.42	34.30

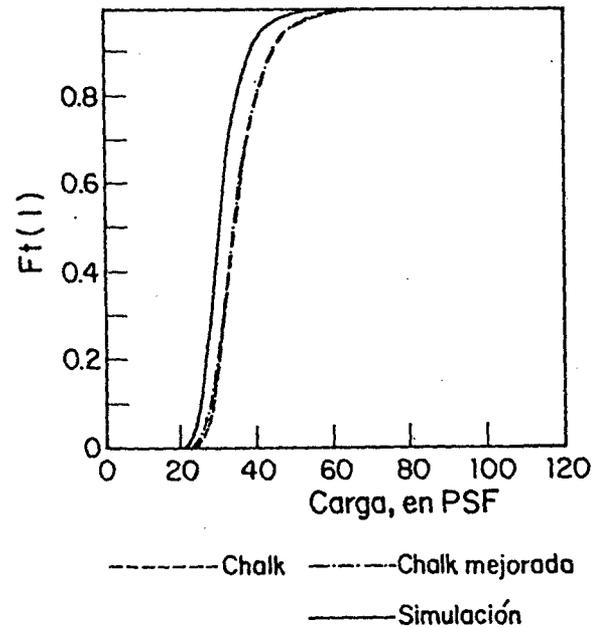
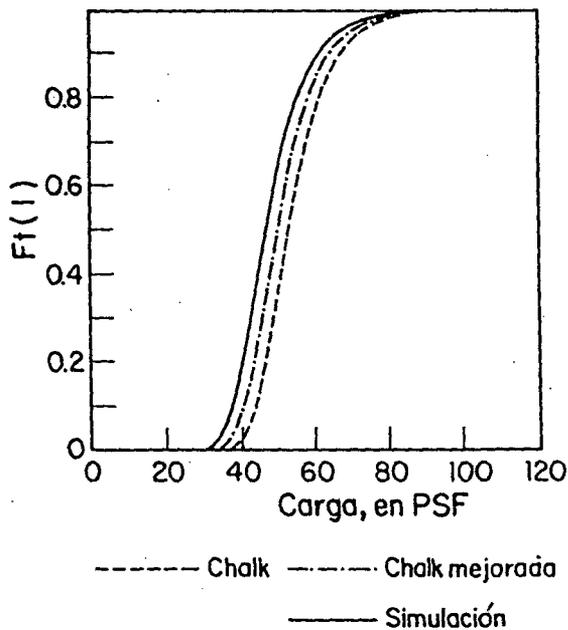
Las funciones de distribución acumuladas de los modelos de cargas vivas totales correspondientes a los modelos de simulación de *Chalk* y *Corotis* (1980) usando la fórmula aproximada de *Wen* (1977), y de estos mismos autores pero usando la formulación de *Wen* mejorada (1979), se presentan en las figs 5.1 a 5.7. En estas se puede observar que las funciones resultan muy similares. Por tanto, se puede concluir que el programa de simulación elaborado en este estudio da resultados satisfactorios.

**Tabla 5.2 Carga total máxima (Chalk mejorada)**  
(fórmula mejorada de Wen)

Ocupación o uso	$L_s$		$L_e$		$L_{e_1}$		$E_T [I]$
	$m_{L_s}$	$\sigma_{L_s}$	$m_{L_e}$	$\sigma_{L_e}$	$m_{L_{e_1}}$	$\sigma_{L_{e_1}}$	
Oficinas	22.13	6.89	35.71	8.51	22.73	7.63	51.93
Hotel	7.20	1.25	40.06	6.31	28.71	6.02	45.50
Residencia ocupada por el dueño	14.69	2.90	28.81	7.02	10.04	4.93	35.70
Residencia rentada	10.34	3.12	28.81	7.02	19.43	6.30	37.10
Comercio, pisos inferiores	32.00	4.09	31.72	3.87	18.77	4.51	53.10
Comercio, pisos superiores	40.44	10.23	21.11	2.59	12.48	3.01	53.30
Salón de clases	22.79	1.78	19.25	2.64	6.90	4.42	32.60

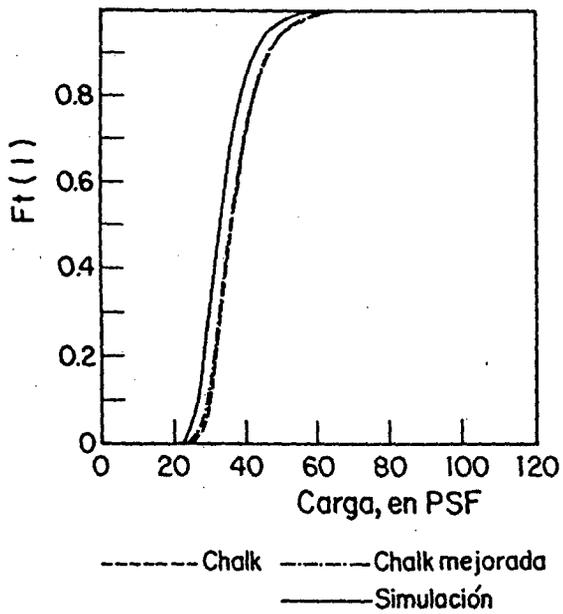
A partir de los parámetros  $\alpha$  y  $u$  (tabla 4.2) se pueden calcular las magnitudes de cargas vivas asociadas a probabilidades de excedencia específicas o bien probabilidades de excedencia asociadas a ciertas cargas específicas. Por ejemplo, si se deseara conocer la probabilidad de que sea excedida cierta carga se utilizaría la ecuación

$$P^* = P(y > y_0) = 1 - F_y(y) = 1 - e^{-e^{-\alpha(y-u)}}$$

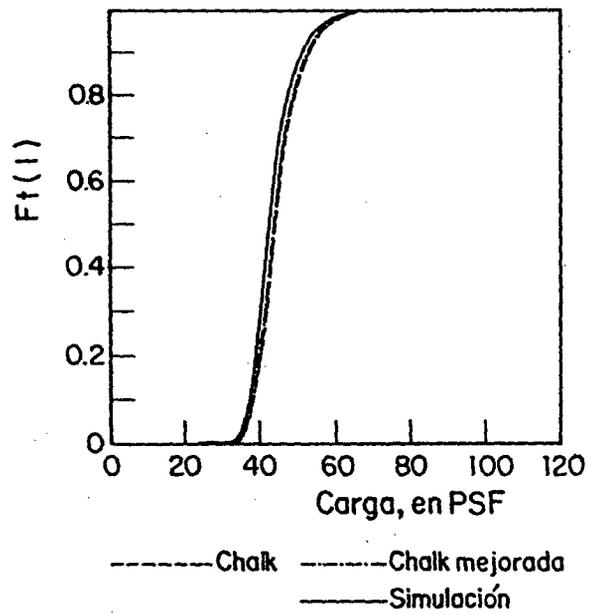


**Fig 5.1 Modelos de cargas vivas totales en oficinas**

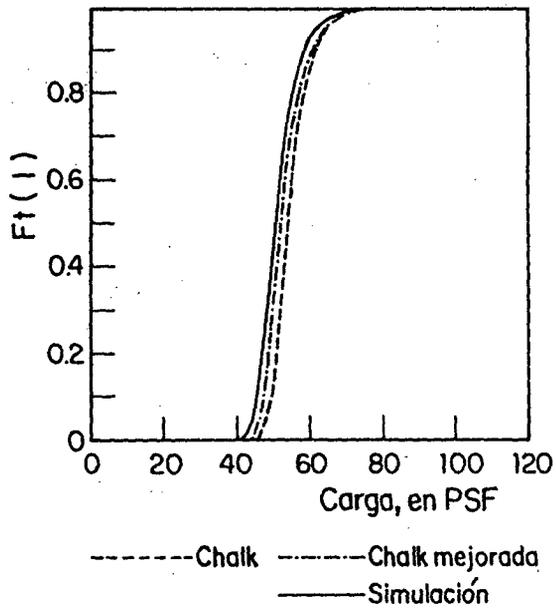
**Fig 5.2 Modelos de cargas vivas totales en residencias**



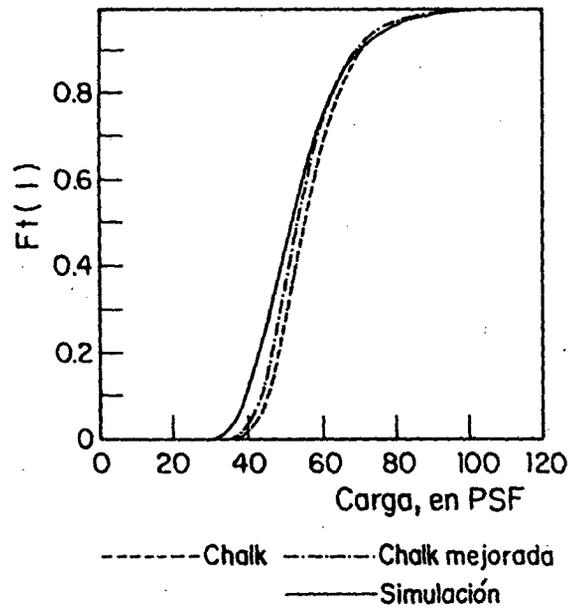
**Fig 5.3** Modelos de cargas vivas totales en residencias rentadas



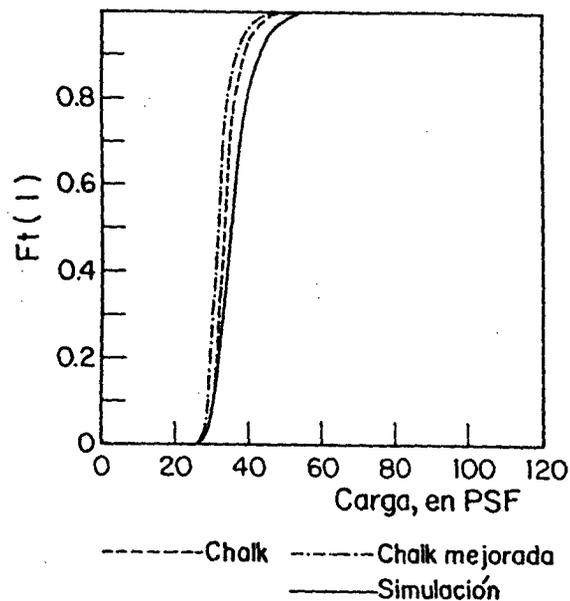
**Fig 5.4** Modelos de cargas vivas totales en cuartos de hotel



**Fig 5.5** Modelos de cargas vivas totales en comercios, pisos inferiores



**Fig 5.6** Modelos de cargas vivas totales en comercios, pisos superiores



**Fig 5.7 Modelos de cargas vivas totales en salones de clases**

Si se desea conocer la probabilidad de que sea excedida una carga 50 lb/pie<sup>2</sup> en un lapso de 50 años para un edificio de oficinas, sustituyendo valores en la ecuación anterior se obtiene

$$P^* = P(y > y_0) = 1 - e^{-e^{-0.124(50-44.421)}} = 39.4\%$$

El porcentaje restante corresponde a la probabilidad de que no se alcance la carga propuesta.

En sentido inverso, si se considera ahora cierta probabilidad de excedencia y los parámetros  $\alpha$  y  $u$  son conocidos, es posible determinar la magnitud de la carga viva mediante la expresión

$$y = u - \frac{\ln(-\ln(F_y(y)))}{\alpha}$$

donde  $P = 1 - F_y(y)$ , corresponde a la probabilidad de excedencia.

Suponiendo que se desea conocer la magnitud de la carga viva que tenga una probabilidad de excedencia de 2 %, si se consideraran los parámetros  $\alpha$  y  $u$  del ejemplo anterior se tiene

$$y = 44.421 - \frac{\ln(-\ln(0.98))}{0.124} ; y = 75.89 \text{ (psf)}$$

Esto significa que este valor tiene un 2 % de probabilidad de que se exceda durante un periodo de 50 años.

Los resultados de la carga viva total asociada a tres distintas probabilidades de excedencia (43, 5 y 2 %), se resumen en la tabla 5.3. Como era de esperarse, los valores de las cargas nominales aumentan al disminuir las probabilidades de excedencia.

**Tabla 5.3 Probabilidades de excedencia, cargas vivas, en lb/pie<sup>2</sup> (fórmula mejorada de Wen)**

Ocupación o uso	Probabilidades de excedencia		
	43 %	5 %	2 %
Oficinas	49.08	68.370	75.89
Hotel	44.46	56.120	60.67
Residencia ocupada por el dueño	32.04	43.170	47.50
Residencia rentada	34.79	47.930	53.05
Comercio, pisos inferiores	52.18	6.287	67.03
Comercio, pisos superiores	54.24	78.150	87.47
Salón de clases	36.87	47.330	51.40

**6. CARGAS VIVAS NOMINALES EN LOS REGLAMENTOS ANSI A58.1 1994 Y RCDF 1993**

En la tabla 6.1 se comparan las especificaciones del ANSI A58.1, del RCDF 1993 y los valores medios de cargas vivas máximas totales obtenidas con tres distintos procedimientos: 1) metodología propuesta por *Chalk* y *Corotis* usando la fórmula aproximada de *Wen* (CHALK, cuarta columna); 2) metodología de *Chalk* y *Corotis* empleando la fórmula mejorada de *Wen* (CHALK', quinta columna); y 3) simulación Monte Carlo (SIM, última columna). Estos últimos se obtuvieron con el programa de computadora (*Soriano*, 1996) desarrollado para este estudio.

**Tabla 6.1 Valores nominales de cargas vivas y resultados de los modelos, en lb/pie<sup>2</sup>**

Ocupación o uso	ANSI	RCDF	CHALK	CHALK'	SIM
Oficinas	50	51.2	55.0	51.93	49.1
Hotel	40	34.8	45.8	45.50	44.5
Residencia ocupada por el dueño	40	34.8	36.5	35.70	32.0
Residencia rentada	40	---	38.5	37.10	34.8
Comercio, pisos inferiores	100	71.7	56.0	53.10	52.2
Comercio, pisos superiores	75	---	57.4	53.30	54.3
Salón de clases	40	71.7	34.3	32.60	36.9

Como puede observarse en la tabla 6.1 los valores nominales propuestos en el ANSI A58.1 son mayores que los del RCDF 93 excepto para salones de clase. Para algunos casos (como p. ej. oficinas) los valores medios son aproximadamente similares a los valores nominales.

En la tabla 6.2 se presentan los porcentajes de probabilidades de excedencia ( $P^*$ ) de los valores nominales propuestos en los dos reglamentos en estudio. La primera columna de esa tabla indica la ocupación del área estudiada; la segunda y tercera se asocian al ANSI A58.1, las columnas cuarta y quinta se refieren al RCDF 1976, y las últimas dos al RCDF 1993. Las probabilidades de excedencia varían según el uso de las áreas. Tanto para el ANSI-1994 como para el RCDF 1993 las probabilidades de excedencia ( $P^*$ ) de las cargas nominales resultan más altas para hoteles que para oficinas. Por otro lado, dichas probabilidades son muy pequeñas tanto para comercios como para salones de clase (se debe tener en cuenta que en este estudio se consideró para salones de clase un lapso de 100 años).

**Tabla 6.2 Probabilidades de excedencia implícitas de los valores nominales de cargas vivas, en lb/pie<sup>2</sup>**

Ocupación o uso	ANSI 1994	$P^*$ , en porcentaje	RCDF 1976	$P^*$ , en porcentaje	RCDF 1993	$P^*$ , en porcentaje
Oficinas	50	65.10	51.2	59.60	51.2	59.60
Hotel	40	85.10	51.2	17.70	34.8	99.60
Residencia ocupada por el dueño	40	32.50	51.2	5.20	34.8	62.90
Residencia rentada	40	23.90				
Comercio, pisos inferiores	100	6.3 E-3	71.7	2.16	71.7	2.16
Comercio, pisos superiores	75	6.40				
Salón de clases	40	8.20	61.5	1 E-2	71.7	4.3 E-4

## 7. CONCLUSIONES

Se elaboró un programa de computadora que utiliza la técnica de simulación Monte Carlo para evaluar la carga total máxima actuante en cierta área y con un periodo de retorno dado. Los resultados que arroja dicho programa se compararon con otros modelos propuestos en la literatura (figs 5.1 a 5.7). Se concluyó que la metodología de simulación da lugar a resultados satisfactorios.

Se calcularon los parámetros ( $\alpha$  y  $u$ ) de las funciones Extrema Tipo I que gobiernan las distribuciones de la carga máxima total para áreas y periodos de retorno dados (tablas 5.1 a 5.3). A partir de dichas funciones se obtuvieron probabilidades de excedencia de los valores que especifican las normas ANSI A58.1 1994, RCDF 1976 y 1993. Para este cálculo se supusieron válidas las estadísticas de cargas vivas de varios países, publicadas por *Chalk* y *Corotis* (1980).

Las probabilidades de excedencia ( $P^*$ ) de las cargas nominales especificadas en el RCDF 1993 son mayores para hoteles y para residencias que las especificadas en el RCDF 1976. Para oficinas dicha probabilidad es la misma para ambos reglamentos; y para áreas comerciales y salones de clase dicha probabilidad es menor para el RCDF 1993 que para el RCDF 1976.

Las probabilidades de excedencia de los valores nominales del RCDF 1993 resultaron de 99.6 % para hoteles, de 62.9 % para residencias y de 59.6 % para oficinas. Por otro lado, dichas probabilidades resultaron mucho menores para áreas comerciales y salones de

clase. Para estos últimos se consideró en el estudio un lapso de 100 años, mientras que para todos los demás usos se adoptó un intervalo de 50 años.

En el presente estudio, se tomaron como válidas las estadísticas de otros países; sin embargo, las probabilidades de excedencia serían distintas si se obtuvieran con datos obtenidos de edificios en México. Debido a lo anterior, el Departamento del Distrito Federal apoyó recientemente un estudio de tipo estadístico para que el Instituto de Ingeniería obtuviera ese tipo de información tanto en oficinas como en escuelas del Distrito Federal (*Vázquez et al, 1995; Sampayo et al, 1996*).

## BIBLIOGRAFÍA

Rosenblueth, E (oct 1959), "Teoría de la Carga Viva en Edificios", *Revista de Ingeniería*, México, DF, pp 51-68

Benjamin, J R y Cornell, C A (1970), *Probability Statistics and Decision for Civil Engineering*, McGraw-Hill, pp 237-311

Peir, Jong-Cherny y Cornell, C A (may 1973), "Spatial and Temporal Variability of Live Loads", *Journal of the Structural Division*, ST5, 9747, pp 903-922

McGuire, R K y Cornell, C A (jul 1974), "Live Loads Effects in Office Buildings", *Journal of the Structural Division*, ST7, 10660, pp 1351-1366

Ghiocel, D y Lungu, D (1975), "Wind, Snow and Temperature Effects on Structures Based on Probability", *Abacus Press*, Tunbridge Wells, Kent, Inglaterra, pp 11-29

Wen, Yi-Kwei (may 1977), "Statistical Combination of Extreme Loads", *Journal of the Structural Division*, ST5, 12930, pp 1079-1093

Ellingwood, B y Culver, C (ago 1977), "Analysis of Live Loads in Office Buildings", *Journal of the Structural Division*, ST8, 13109, pp 1551-1560

Wen, Yi-Kwei (oct 1979), "Statistics of Extreme of Live Load", *Journal of the Structural Division*, ST10, 14886, pp 1893-1900

Chalk, P L y Corotis, R B (oct 1980), "Probability Model for Design Live Loads", *Journal of the Structural Division*, ST10, 15753, pp 2017-2033

Harris, M E, Corotis, R B y Bova, C J (may 1981), "Area-dependent Processes for Structural Live Loads", *Journal of the Structural Division*, ST5, 16266, pp 857-872

Manual de Diseño de Obras Civiles (1981), "Estructuras" ( C.1.2 ACCIONES ), Instituto de Investigaciones Eléctricas, CFE, México, DF, pp 1.2.1-1.2.19

Sóbol, I M (1983), *Método Monte Carlo*, Ed MIR, Moscú, pp 1-78

---

*Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal* (Criterios de Diseño Estructural, Cargas Vivas) (1988), Editores Mexicanos Unidos, México, DF, pp 124-136

Wen, Yi-Kwei. (1990), *Structural Load Modeling and Combination for Performance and Safety Evaluation*, Elsevier, Nueva York, pp 1-219

*American National Standards Institute* (1990), "Minimum Design Loads for Building and other Structures", *ASCE*, Nueva York, pp 1-7, 48-53

*American National Standards Institute* (1994), "Minimum Design Loads for Building and other Structures", *ASCE*, Nueva York, pp 1-7, 92-98

Esteva Maraboto, L (1994), Entrevista personal, *Instituto de Ingeniería, UNAM*, México, DF

Rodríguez Cuevas, N (1995), Entrevista personal, *Instituto de Ingeniería, UNAM*, México, DF

Vázquez, M, Cervantes, G, Urrego, O E, Soriano, J A y Ruiz, S E (dic 1995), "Estudio estadístico sobre cargas actuantes en pisos de oficinas en el Distrito Federal", Informe de investigación para el Departamento del Distrito Federal, Instituto de Ingeniería, UNAM

Soriano Martínez, J A (1996), "Análisis Teórico sobre Cargas Vivas en Edificios", tesis, de maestría, DEPMI, UNAM, México, DF

Sampayo, A, Ruiz, S E, Vázquez, M, Cervantes, G y Soriano, J A (dic 1996), "Estudio estadístico sobre cargas actuantes en aulas de escuelas en el Distrito Federal", Informe de investigación para el Departamento del Distrito Federal, Instituto de Ingeniería, UNAM