

Heriberto Echezuria



PROBABILIDAD DE DAÑOS EN EDIFICACIONES DISEÑADAS CONFORME A LAS NORMAS

RESUMEN

Se plantea la probabilidad de daños a edificaciones considerando la Capacidad como variable determinista, calculada según las condiciones de diseño específicas de la normativa sismorresistente, y la Demanda Sísmica como variable aleatoria. La probabilidad de falla se define entonces como la probabilidad de que la demanda exceda la Capacidad. Este planteamiento también utiliza un modelo de Poisson para estimar la probabilidad de obtener distintos tipos de daños y la cantidad de edificios que podrían dañarse, durante la vida útil atendiendo las características de la provincia sísmica y considerando que se han seguido adecuadamente o no todos los aspectos de diseño normativo.

Palabras claves: Probabilidad, capacidad, demanda, confiabilidad, sismorresistente.

SUMMARY

The probability of building damage is formulated considering the Capacity as a deterministic variable, calculated as required by local seismic codes, and the Seismic Demand as a random variable. The probability of failure is defined then as the probability that the demand exceeds the capacity. This formulation also uses a Poisson model to estimate the probability of different types of damages and the amount of buildings that could be damaged during a given life span, taking into account the characteristics of the seismic province and considering whether or not all seismic code requirements have been properly fulfilled.

Key words: Probability, capacity, demand, reliability, seismic design.

Introducción

Es un hecho que los valores utilizados para diseño de edificaciones han sido establecidos con criterios que apuntan a tratar de preservar la vida de las personas mediante un diseño adecuado que permite limitar los costos manteniendo niveles altos de seguridad ante el colapso, aunque otros daños severos puedan ocurrir en la edificación. A tal efecto, desde la perspectiva de la ingeniería sísmica aplicada a la sismorresistencia, la práctica común de la ingeniería ha sido establecer un período de retorno que tiene una probabilidad específica de excedencia durante la vida útil de la edificación.

En consecuencia es posible que, durante su vida útil, la edificación experimente fuerzas mayores que las de diseño, con lo cual podría experimentar daños mayores que los esperados por la normativa sismorresistente. De allí surgen las preguntas, ¿Cuál es la probabilidad de que una edificación diseñada y construida según establece la normativa sismorresistente soporte las fuerzas que excedan las de diseño sin colapsar? y ¿Cuál es la probabilidad de colapso de una estructura diseñada de acuerdo con la práctica utilizada antes de la emisión y puesta en práctica de la norma sismorresistente?

Es crucial entonces tener una respuesta a esas preguntas y a otras que muy bien podrían hacerse las autoridades de una localidad, por cuanto ellos tienen la responsabilidad de planificar los recursos y las vías de atención hacia las zonas donde se espera que ocurran mayores daños. Adicionalmente a las preguntas anteriores están otras relacionadas con la cantidad de daños que limitarían la habitabilidad de las edificaciones tales como: ¿Cuál es la probabilidad de obtener las primeras rótulas plásticas de la edificación? O ¿Cuál es la probabilidad de obtener un número determinado de rótulas plásticas? O ¿Cuál es la probabilidad de obtener la máxima cantidad de rótulas antes de que la edificación colapse debido a las fuerzas sísmicas?

Ahora bien, en este artículo se formula una metodología que permite contestar las preguntas anteriores considerando que podemos manejar

puntualmente y por separado la variabilidad en las propiedades ingenieriles de la capacidad de la edificación. En otras palabras, tomamos valores discretos de dichos parámetros y calculamos el desempeño de la edificación con algún método de análisis conocido. De esta manera tenemos la respuesta a esa condición de diseño o construcción como valor determinista.

De esa manera se puede atender y discriminar el desempeño de la edificación para los casos particulares de diseño y construcción que se desee estudiar y calcular las probabilidades de cada uno de acuerdo con una metodología que se explicará más adelante. Así se puede también contestar la pregunta: ¿Cuántas edificaciones construidas sin los correspondientes controles de calidad y buenas prácticas constructivas se espera que colapsen durante la vida útil en la zona sísmica donde está ubicada?

En resumen, el ingeniero puede variar las resistencias de los materiales utilizados o evaluar cuando son afectados algunos elementos estructurales que contribuyen al colapso para estimar el desempeño de la edificación ante cargas sísmicas en esas condiciones. Para todas las condiciones antes descritas la Capacidad puede ser considerada determinista y su variabilidad es controlada por el ingeniero a cargo del cálculo o los análisis. Estos conceptos son los mismos que constituyen los fundamentos de las escalas de evaluación de daños a las edificaciones, tal como la escala Modificada de Intensidades de Mercalli.

El desempeño como base para evaluar la probabilidad de falla de edificaciones en zonas sísmicas

Las Intensidades Modificadas de Mercalli (MMI) constituyen un ejemplo claro de cómo expresar el desempeño de las edificaciones con base en la demanda al describir los daños esperados de dichas edificaciones ante la acción del sismo. Esto ha permitido que los daños causados por eventos sísmicos puedan correlacionarse con la aceleración máxima del terreno, lo cual ha sido realizado por distintos investigadores según se ilustra en la Fig.1. Es oportuno destacar que podemos considerar cada tipo de daño como un tipo de falla particular con respecto a las distintas funciones de los miembros de la edificación o la edificación misma.

Lo interesante de esas correlaciones entre las aceleraciones sísmicas y los daños, o desempeño, es que las aceleraciones son absolutas, es decir, son independientes de la provincia sísmica donde dichas edificaciones estén ubicadas. Como consecuencia de lo anterior, esas correlaciones entre la demanda y el desempeño pueden ser aplicadas en distintas provincias sísmicas lo cual nos permite asignar inmediatamente los períodos de retorno o la probabilidad de exceder cada una de las aceleraciones del terreno. De esta

manera la demanda pasa a ser definida por la amenaza sísmica probabilista del sitio.

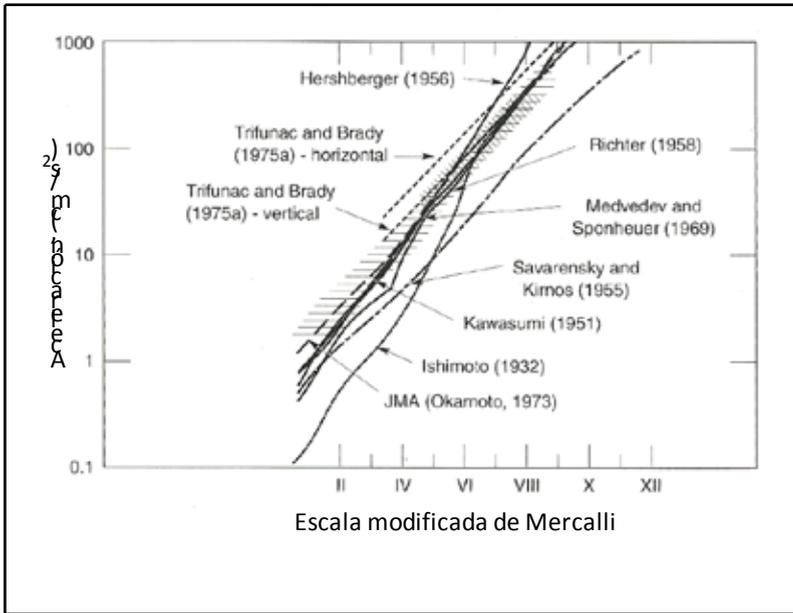


Fig. 1 Correlaciones entre la intensidad de Mercalli (MMI) y la aceleración del terreno. Tomada de [1]

Con base en estas correlaciones podemos interpretar que existe un nivel medio de daños esperado con cada valor de la aceleración del terreno, el cual tiene cierta variabilidad, que podemos evaluar con una media de todas esas correlaciones. Alternativamente, podemos estimar los daños estableciendo de la mejor manera posible el diseño de la edificación y calcular su desempeño con algún método de análisis con aceleración incremental y establecer el nivel de daño que va apareciendo a medida que aumentamos la aceleración. Esto lo ilustramos en la Fig. 2 para una edificación evaluada por Lopez y otros [2] con el método *push over*. En dicha figura se muestra la relación entre el cortante basal y el nivel de desplazamiento del modelo de la escuela Valentín Valiente en Cariaco a medida que es cargada incrementalmente.

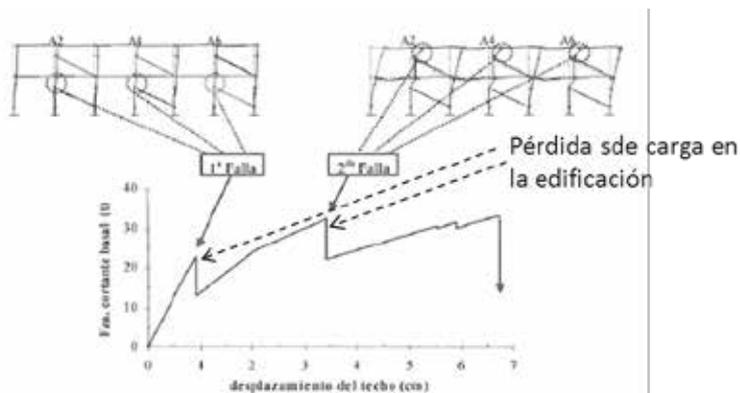


Fig. 2 Evaluación del desempeño de la escuela Valentín Valiente de Cariaco utilizando el método de carga estática incremental. Tomada de [2]

El método de carga estática incremental (push over) es muy conveniente para establecer el umbral al cual comienzan a ocurrir los distintos daños hasta que ocurre el colapso de la edificación, véase la Fig.2. De esta manera, podemos establecer los indicadores descriptivos de los daños en forma similar a la forma como lo hace la MMI y realizar el análisis de desempeño para distintas condiciones de diseño o construcción de la edificación. Es bueno destacar que cada nivel de daños detectado va asociado a la aceleración a la cual comenzó a aparecer, con lo cual los daños son condicionales a la ocurrencia de dicha aceleración.

El análisis anterior aplica a cada condición de diseño o construcción que se decida explorar. Por lo tanto, cada análisis es también condicional con el tipo de diseño o construcción o calidad de los materiales seleccionados.

Ahora bien, en caso que nos interesara conocer la probabilidad de cualquier tipo de daños asumiendo que todo lo establecido en el diseño sismorresistente se ha cumplido sin desviaciones y también se han seguido adecuadamente las buenas prácticas constructivas, ese daño ocurrirá a un valor único de la aceleración. En consecuencia, la probabilidad de que se verifique dicho daño en la edificación está relacionada con la probabilidad de que esa aceleración umbral del daño estudiado sea excedida en la zona donde está ubicada dicha edificación.

De esta forma, logramos que el planteamiento de la falla sea probabilista en términos de la demanda (amenaza sísmica probabilista) pero determinista en términos de la capacidad, pues considera que se han seguido adecuadamente el diseño conforme a la norma y las buenas prácticas constructivas. De esta manera, es posible evaluar cuantitativamente cómo cambiarán los niveles de aceleración capaces de generar distintos tipos de daños a edificaciones

diseñadas en otras condiciones distintas a las anteriores cuyas características las fija el ingeniero a cargo del proceso de análisis.

Esta metodología efectivamente puede incorporar las incertidumbres tanto de la Capacidad como de la Demanda sólo que, en este caso, la incertidumbre de la Capacidad es manejada por el ingeniero a cargo de realizar los análisis al variar las condiciones de diseño o construcción. Es decir, la incertidumbre en la capacidad es evaluada puntualmente para condiciones específicas que se desean comparar entre si, en consecuencia, el desempeño de la edificación cambiará para cada condición analizada.

Lo interesante de ese planteamiento es que permite ver los cambios en las probabilidades de obtener un mismo tipo de daños al cambiar bien las condiciones de diseño o de construcción separadamente y evaluar el peso o importancia de cada una con un mismo método de análisis. Lo mismo aplicaría si se deseara evaluar el método de análisis, pues para las mismas condiciones de diseño o construcción se utilizarían dos o más modelos.

Nótese, también en la Fig. 2, que los daños aparecen de manera progresiva en la edificación, comenzando con las primeras rótulas hasta obtener una condición de mecanismo inestable. De la misma manera, el daño puede ser considerado entonces como un proceso incremental con los más leves apareciendo primero y los más severos después.

Al repetir el procedimiento anterior cambiando las propiedades de la estructura considerando que algunas o todas las normas o las buenas prácticas constructivas no se han cumplido, es posible entonces estimar la probabilidad de daños o colapso para cada una de esas condiciones estudiadas y compararlas con la anterior, donde todo se ha cumplido adecuadamente.

Este procedimiento es ideal para dar respuesta a preguntas tales como: ¿Cuál es la probabilidad de colapso de una estructura que ha sido diseñada de acuerdo con la norma, considerando que durante su vida útil puede estar sometida a sismos más intensos que el de diseño? o ¿Cuál la probabilidad de formación de rótulas plásticas en esa estructura? o ¿Cuál es la probabilidad de falla de una edificación que, por cualquier razón, fue diseñada bajo prácticas constructivas no acordes con las buenas prácticas de QA/QC? o ¿Cuál es el número esperado de colapsos de edificaciones existentes construidas en las décadas anteriores a 1967 de acuerdo con las normativas utilizadas en esa época? Así como estas, existen otras preguntas que pueden ser contestadas aplicando esta metodología.

Definición de la probabilidad de daños y la confiabilidad

Para continuar con el desarrollo del método indicamos que los daños corresponden a cualquier condición prevista en el funcionamiento de la edificación que deja de cumplirse, bien por parte de los miembros o de la edificación misma. Como ya hemos señalado, existe una probabilidad asociada con cada una de esas condiciones la cual exploramos a continuación. Antes, definiremos la Confiabilidad para un tipo de daño o condición cualquiera como el complemento de la probabilidad de ocurrencia de dicha condición, la cual no cumple con el funcionamiento esperado de la edificación:

$$R + p_f = 1 \quad (1)$$

donde, R , es la confiabilidad y, p_f , es la probabilidad de ocurrencia de la condición indeseada, tales como rótulas o colapso.

Tal como hemos mencionado, es conveniente establecer el valor a estudiar de la capacidad como un valor único condicional o determinista sin incertidumbre. Así, la única variable aleatoria pasa a ser la demanda.

En ese caso, la variabilidad o incertidumbre en la capacidad es tomada en cuenta, separadamente, al variar en forma determinística los aspectos sobre los cuales se desea discernir su efecto en el desempeño. En general, es de mucho interés poder evaluar el efecto de diseñar conforme a las normas o no, al igual que construir de acuerdo con las buenas prácticas de la ingeniería o no.

Ahora bien, cuando la Capacidad no es una variable aleatoria entonces la probabilidad de falla corresponde a los casos en que la Demanda excede la Capacidad para cada una de las condiciones estudiadas. Posteriormente, se comparan los valores de las demandas que causan el funcionamiento contrario a las funciones deseadas para la edificación a objeto de establecer conclusiones. Este procedimiento será el empleado en este trabajo y se explicará en mayor detalle en la próxima sección de este artículo.

Evaluación de la probabilidad de falla o daños a partir del desempeño y la amenaza sísmica probabilista

Tal como hemos explicado, al aplicar el método de carga estática incremental para evaluar el desempeño de la edificación, podemos identificar la aceleración a partir de la cual comienzan a ocurrir los daños en la misma para unas condiciones específicas dadas. Estas condiciones pueden ser que se hallan seguido todos los aspectos normativos y las buenas prácticas de QA/QC o que algunas de ellas no se hubiesen cumplido, como por ejemplo que el concreto tuviese menos resistencia que la especificada. De tal manera que esa condición específica puede ser tomada como determinista y representativa de las condiciones particulares del análisis. Recuérdese que si realizamos

el mismo procedimiento variando los distintos aspectos normativos o de calidad, podemos entonces establecer las aceleraciones que generan los daños seleccionados para estudiar en la misma edificación dado que no se cumplieron los aspectos considerados bien en la normativa o en las prácticas de construcción.

Ahora bien, considerando que conocemos la amenaza sísmica probabilista del sitio en términos las aceleraciones sísmicas máximas del terreno o de las ordenadas espectrales, entonces es posible afirmar que se puede utilizar la tasa anual de excedencia de la aceleración como la tasa anual de obtención de daños, de acuerdo con la expresión a continuación:

$$p(\text{daños}) = p(a \geq a_d) \tag{3}$$

En la expresión anterior, el término $p(\text{daños})$ es la probabilidad anual de ocurrencia de cualquier daño en la edificación el cual hemos asumido igual a $p(a \geq a_d)$, que es la probabilidad de exceder anualmente la aceleración que inicia los daños, a_d , según se ilustra en la Fig.4. La lógica en la aplicación de la expresión (3) está en que las aceleraciones sísmicas son estudiadas mediante un proceso de Poisson [3, 4] y por la condición de causa efecto podemos inferir que los daños siguen el mismo proceso.

En la Fig.4, la Demanda está expresada por la probabilidad de exceder un nivel cualquiera de aceleración del terreno, lo cual es la práctica usual en la ingeniería sísmica. La Capacidad viene dada por el valor único de la aceleración a la cual comienzan a ocurrir los daños bajo estudio.

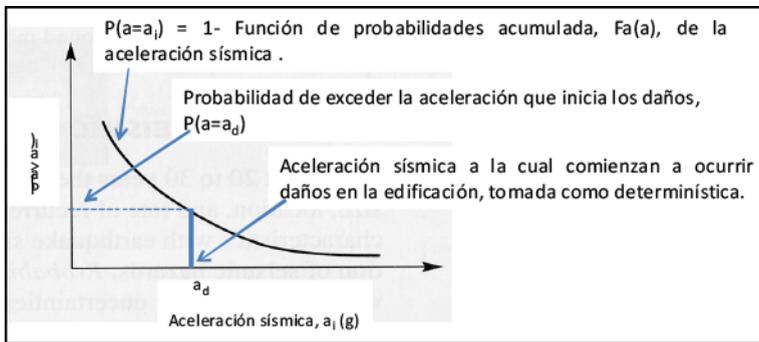


Fig. 4 Problema de Capacidad-Demanda con Capacidad determinista y Demanda aleatoria.

Es bueno destacar que el mismo criterio explicado en el párrafo anterior aplica si se utilizara una aceleración espectral cuya amenaza sea conocida. Esto resulta conveniente ya que la edificación experimenta la acción de dicha componente y no es necesario realizar ajustes cuando se utiliza la aceleración

máxima del terreno. Esto se abordará cuando se planteen los ejemplos de aplicación utilizados en este artículo.

Aplicaciones de la estimación de la probabilidad de falla en función de la amenaza sísmica probabilista

Dado que hemos asumido que la probabilidad anual de exceder el valor de la aceleración sísmica umbral de daños es igual a la tasa anual de observación de daños, es posible entonces utilizar un proceso de Poisson para evaluar la probabilidad de obtener cualquier tipo de daños en las edificaciones:

$$F(\text{daños}_j/a \geq a_d) = F(a \geq a_d) = 1 - [(e^{-\lambda t}) (\lambda t)^k / k!] \quad (4)$$

Donde: $F(\text{daños}_j/a \geq a_d)$ es la probabilidad de observar daños iguales o más severos que los de un tipo de daños cualquiera (recuerdese que el desempeño es una función incremental de daños), j ; dado que se excede la aceleración umbral que los causa, a_d ; λ , es la probabilidad de excedencia anual de la aceleración umbral para ese tipo de daños, la cual es igual a la tasa de ocurrencia anual del daño considerado; t , es el período para el cual se hace la predicción y, k , es el número de edificaciones que resultarán afectadas por ese tipo de daños cuando se sobrepasa el nivel de aceleración en estudio. Nótese que si $k = 0$ se obtiene la probabilidad de no experimentar ningún daño en ninguna edificación. El complemento de Poisson para esta condición corresponde a la probabilidad de que al menos una edificación presente algún tipo de daños igual o más severo que el estudiado.

Si repetimos este procedimiento para otras condiciones de daños secuenciales o acumulativos obtendremos las probabilidades de cada una de esas condiciones. Por ejemplo, para la condiciones de formación de rótulas plásticas y el colapso, obtendremos la probabilidad de que una o más edificaciones formen rótulas o colapsen, según el análisis realizado, y considerando que se han seguido todas las normas y las buenas prácticas constructivas. Nótese que en esos casos, k , es el número de edificaciones que forman rótulas o colapsan, con lo cual si, $k=0$, significa que no habrá rótulas o colapsos, respectivamente.

Es bueno destacar que si se han seguido adecuadamente las distintas normas y las prácticas constructivas, es de esperar que para una edificación con período estructural, $T_{\text{estr-}i}$, la aceleración espectral que inicia los daños a dicha edificación sea mayor que la del espectro de diseño elástico normativo. Esto se debe a que el diseño tal como lo concibe la norma nos permite un extra de capacidad adicional orientado a preservar las vidas humanas aunque la edificación sufra daños severos. En tal sentido es oportuno destacar que el espectro de colapso, considerando que todas las normas se han seguido

adecuadamente, debe tener un PR mayor que el espectro de umbral de daños y este a su vez debe tener un PR mayor que el espectro de diseño.

Con esta metodología también es posible estimar cual ha sido el nivel de Ductilidad desarrollado por la edificación hasta alcanzar cada una de las definiciones de falla que se empleen. A tal fin se deben analizar detalladamente los desplazamientos entre pisos y los niveles de aceleración espectral necesarios para alcanzar dichas condiciones para distintas condiciones de rigidez de la estructura.

La cantidad de edificios dañados para un cierto nivel de aceleración del terreno se puede estimar tal como se describe a continuación. Si consideramos que estudiamos la aceleración a la cual comienzan a aparecer las rótulas plásticas, entonces tomando, n , como el número total de edificaciones similares en una localidad; m , como el número de edificaciones similares dañadas con formación de las primeras rótulas plásticas y r , como el número de edificaciones similares no dañadas con rótulas plásticas, el cálculo con el proceso de Poisson, $[(e^{-\lambda t}) (\lambda t)^k / k!]$, nos aporta un aproximado de la probabilidad de observar edificios similares sin daños por rótulas plásticas = r/n .

La cantidad de edificios con cualquier tipo de daños viene dado por la diferencia entre el número total de edificaciones, n , y el número de las que no forman rótulas, r . El complemento de Poisson, $(1 - [(e^{-\lambda t}) (\lambda t)^k / k!])$, aproxima la probabilidad de observar edificios con una o más rótulas plásticas = m/n . Nótese que esto incluye las edificaciones que forman mecanismos debido a las rótulas y colapsan. De la misma manera, para el colapso tenemos que el complemento de Poisson aproxima la probabilidad de observar edificios dañados con rótulas que colapsan, m_c/n . En la ecuación anterior, m_c , es el número de edificios dañados con rótulas que colapsan y, n , tal como se definió antes.

En consecuencia, si se tiene una buena estimación del número total de edificaciones de planta similar diseñadas de acuerdo con las normativas, se pueden aproximar la cantidad de edificaciones que sufrirán daños de distintos tipos que podrían estar tipificados por las autoridades. Similarmente, para sectores de la ciudad con condiciones distintas a las normativas actuales se puede estimar el número de edificaciones afectadas con el mismo tipo de daños.

De particular interés resulta el hecho de que las edificaciones hechas con procedimientos empíricos, típicos de las zonas donde residen personas de pocos recursos que no pueden realizar procedimientos de control de calidad adecuados, son muy susceptibles a presentar valores de aceleraciones bastante más bajos que los normativos. En estas zonas esta metodología

resulta de gran utilidad si se tienen sectorizadas esas áreas con base en el tamaño y número de las edificaciones parecidas.

Similarmente, edificaciones hechas con criterios distintos a los exigidos en las normas modernas construidas durante los años en que no se tenían claros los conceptos de diseño sismorresistente, también pueden presentar este mismo tipo de deficiencia, lo cual amerita su reforzamiento. Esto fue comprobado en el estudio sobre el riesgo sísmico de las escuelas nacionales [2], en el cual escuelas diseñadas en las décadas de los años 50 y 60 colapsaron a valores bastante por debajo de los normativos actuales.

Ejemplo de aplicación de la metodología propuesta para estimar la probabilidad de falla de edificaciones

A continuación analizaremos los casos de la Escuela Valentín Valiente y del Liceo Raimundo Martínez Centeno de Cariaco antes referidos. De acuerdo con López y otros [2] la escuela fue diseñada en los años 50 con los códigos de esa época. Aunque no conocemos exactamente las formas espectrales que aplicarían a dichos diseños, podemos aproximar el coeficiente sísmico atendiendo al hecho de que la ductilidad de dicha edificación debió estar entre 1 y 2 de acuerdo con sus características estructurales [2].

La fuerza máxima indicada por el análisis de carga incremental fue de 32 ton y el período de la edificación se estimó en 0,65s [2]. Tomando en consideración lo antes expuesto y un perfil S3, la aceleración espectral a la falla sería de aproximadamente 0,102g. Haciendo un análisis inverso utilizando el espectro, la ductilidad y la importancia de la edificación, se puede estimar la aceleración A_0 del terreno equivalente para diseño según la norma actual. Si tomamos $D=1$ tendríamos entonces un coeficiente sísmico $A_0=0,037$, mientras que si tomásemos $D=2$, tendríamos un $A_0=0,074$. Esto de incluye en la Tabla 6 para la escuela y el liceo. De acuerdo con la data disponible por el autor [5], el período de retorno para una aceleración de $A_0=0,19g$ en esa misma zona sísmica sería inferior a los 20 años. Adicionalmente, el período de retorno más bajo que se pudo manejar fue de unos 10 años para una aceleración del terreno $A_0=0,158g$. Con estos valores de PR se obtienen probabilidades de falla para la escuela entre 91,8% y 99,3% para una vida útil de 50 años. En otras palabras, la probabilidad de que esa edificación colapsara en esa zona sísmica era muy alta, tal como en efecto se verificó cuando ocurrió el sismo de Cariaco 1997, luego de unos 40-50 años de funcionamiento.

Para el Liceo Raimundo Martínez que también colapsó en el sismo de Cariaco de 1997, tenemos que la capacidad de la estructura estuvo en el orden de las 450t [2]. En este caso el peso se estimó en 1900t y el período de la estructura se estimó en 0,58s [3]. Con estos datos y asumiendo perfil

S3, se puede estimar la aceleración espectral en 0,237g. Haciendo el mismo análisis inverso utilizando el espectro, la ductilidad y la importancia de la edificación, se estimó la aceleración A_o del terreno equivalente para diseño según la norma actual para $D=1$, $A_o= 0,087$, mientras que si tomásemos $D=2$, sería $A_o= 0,174$. Véase la Tabla 6. Tal como se mencionó antes, de acuerdo con la data disponible por el autor [5] aplican las mismas probabilidades de falla que para la escuela, es decir, el liceo también tenía entre 91,8% y 99,3% de probabilidades de colapsar para una vida útil de 50 años.

Tabla 6. Datos de la escuela Valentín Valiente y el Liceo Raimundo Martínez Centeno de Cariaco, para análisis de probabilidad de colapso.

Escuela Valentín Valiente			Liceo Raimundo Martínez Centeno		
	Espectro S3			Espectro S3	
	alfa _n	1,3		alfa _n	1,3
	fi _n	0,75		fi _n	0,75
	beta _n	2,8		beta _n	2,8
	T _n	0,65		T _n	0,56
	A _n	0,102		A _n	0,237
	T* _n	1		T* _n	1
D=1	A _{o1}	0,037	D=1	A _{o1}	0,087
D=2	A _{o2}	0,074	D=2	A _{o2}	0,174
Según la data disponible, para $A_o < 0,19$, $10 < T < 20$ años					

A los fines de continuar ilustrando la aplicabilidad del método, asumamos por un momento que esas edificaciones hubiesen estado localizadas en la zona 1 en lugar de la zona 7. Es decir, pasamos de la zona de mayor intensidad a la de menor intensidad sísmica del país. En ese caso, los períodos de retorno para la escuela habrían sido entre 89 y 120 años, con lo cual la probabilidad de falla estaría entre 34% y 43%. Esta probabilidad de falla es bastante alta para este tipo de estructura. En el caso del liceo los períodos de retorno se ubicarían entre 460 y 500 años, con lo cual la probabilidad de falla estaría entre 9,5% y 10%. Esta probabilidad también es relativamente alta para este tipo de edificaciones, considerando que las mismas deben experimentar daños menores y mantenerse en pie para apoyo a las personas que resultasen damnificadas. En otras palabras, estas edificaciones diseñadas con los códigos anteriores al actual resultan muy vulnerables para las condiciones sísmicas del país, aún para la zona 1 que es la de menor sismicidad. De allí la importancia de establecer medidas para reforzar este y otros tipos de edificaciones diseñadas antes de la publicación de las normas sismorresistentes actuales.

Conclusiones

Es posible evaluar los daños de una edificación con base en el desempeño en forma similar a la escala de Intensidad Modificada de Mercalli, utilizando un modelo de carga incremental. Así se puede estimar la probabilidad de daños considerando la Capacidad obtenida del modelo de carga incremental como variable determinista y la Demanda (la amenaza sísmica) como variable aleatoria. La probabilidad de daños se define entonces como la probabilidad de que la demanda exceda la Capacidad. El planteamiento de la probabilidad de daños en esta forma permite diferenciar los efectos de los cambios en el diseño o las prácticas constructivas o los modelos de análisis en el desempeño de la edificación y estimar la probabilidad de obtener distintos tipos de daños.

La aplicación del método para dos casos históricos, i.e. escuela Valentín Valiente y liceo Raimundo Martínez Centeno, que colapsaron durante el terremoto de Cariaco de 1997 confirma que el mismo es aplicable y predice acertadamente que dichas edificaciones tenían muy altas probabilidades de colapso (entre 92% y 99%) para una vida útil de 50 años, las cuales evidencian la inminencia del colapso que ocurrió. Se estimaron también las probabilidades de colapso si dichas edificaciones hubiesen estado localizadas en la zona 1, lo cual arrojó entre 34% y 43% para la escuela Valentín Valiente y entre 9,5% y 10% para el liceo Raimundo Martínez. Dichas probabilidades siguen siendo altas para este tipo de edificaciones. Como se ve, el método predice acertadamente las probabilidades de colapso de edificaciones diseñadas antes de la aparición de las normas sismorresistentes actuales.

Adicionalmente, esta formulación nos permite estimar la probabilidad de observar un tipo de daños cualquiera durante un período de tiempo establecido ya que es posible aplicar el modelo de Poisson a otros daños de la misma manera en que lo aplicamos al colapso. Lo anterior nos permite también estimar la cantidad de edificios que sufrirán daños de algún tipo y cuántos de ellos colapsarán. Debido a esto el modelo es una herramienta muy valiosa para las autoridades que deben planificar las rutas de escape y las vías de atención hacia las zonas con mayor número de edificaciones con daños severos o que colapsen.

Referencias

- [1] KRAMER, S.L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, 1996.
- [2] LÓPEZ, O.A., HERNÁNDEZ, J., DEL RE G., J. PUIG, , *Reducción del Riesgo Sísmico en Escuelas de Venezuela*, Boletín Técnico Vol. 42, No 3, IMME, UCV, Caracas, Vzla, Oct-2004.

- [3] HARR, M.E., *Mechanics of Particulate Media, A Probabilistic Approach*, Mc Graw-Hill, 1977.
- [4] DEVORE, Jay L., *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, Brooks/Cole, 1982.
- [5] ECHEZURÍA, H. "Procedimiento estadístico para obtener espectros elásticos con diferentes períodos de retorno compatibles con la amenaza sísmica", *Tekhné*, No. 14, UCAB, Caracas, Vzla, Mayo 2012.