

## **ANALISIS DE LA PROBABILIDAD DE FALLA DE PORTICOS SISMORRESISTENTES DISEÑADOS SEGUN EL REGLAMENTO INPRES-CIRSOC 103**

**Horacio N. Fideleff, Oscar Möller, Marcelo Rubinstein**  
*Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (I.M.A.E.),  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura  
Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina*

### **RESUMEN**

Se presenta una investigación tendiente a establecer la situación de estructuras sismorresistentes, diseñadas de acuerdo al Reglamento INPRES-CIRSOC 103, con respecto a su probabilidad de falla.

Se desarrolla una metodología de cálculo que asume hipótesis usuales en dinámica estructural para efectos sísmicos y se realizan aplicaciones sobre pórticos en las zonas sísmicas más severas, del código mencionado.

Los resultados permiten obtener, especialmente de modo comparativo, conclusiones de interés del punto de vista probabilístico.

### **ABSTRACT**

A research is presented to look at the situation of seismic-resistant structures designed by the INPRES-CIRSOC 103 Code, with regard to its probability of failure.

It was developed a calculation methodology, using usual hypothesis of the structural dynamics under seismic effects, and applications was made in frames located in the superior level seismic zones of the mentioned code.

The results allow to obtain, specially in comparative mode, conclusions of interest from the probabilistic point of view.

### **INTRODUCCION**

Los códigos estructurales modernos están basados en la Teoría de la Confiabilidad Estructural, de modo que los coeficientes que afectan a las cargas y a las resistencias cuentan con un sostén probabilístico que trata de asegurar una probabilidad de falla preestablecida, constituyendo así un marco racional para el diseño<sup>1</sup>.

Desde este punto de vista resulta de interés básico investigar la probabilidad de falla de estructuras sismorresistentes típicas, diseñadas utilizando el Reglamento INPRES-CIRSOC 103<sup>2</sup>, con el objetivo de analizar sus valores y grado de dispersión, al variar los parámetros estructurales y zonas sísmicas. Los resultados servirán de guía para futuras actualizaciones del código mencionado.

Con el objetivo expuesto, en este trabajo se desarrolla un método de análisis de confiabilidad aplicable a estructuras sismorresistentes.

Las características aleatorias de la sollicitación o demanda, consistente en la acción sísmica, son tales que hacen razonable asumir, por comparación, en forma determinística tanto las funciones de transferencia, que permiten calcular la respuesta estructural, como las variables que representan a la resistencia o suministro<sup>3</sup>.

La sollicitación se traduce en el desplazamiento horizontal máximo demandado en la cima de la estructura, tratado como una variable aleatoria, suponiendo comportamiento elástico ideal.

La resistencia o capacidad estructural queda representada, en correspondencia con la sollicitación, por el desplazamiento último en la cima, calculado, en forma determinística, en el campo no lineal, según criterios de fallas actuales<sup>4</sup>.

Asumiendo la igualdad entre el desplazamiento de la respuesta no lineal y el del comportamiento elástico ideal<sup>5</sup>, la probabilidad de falla de la estructura se identifica con la probabilidad que el desplazamiento último en la cima disponible sea menor que el demandado<sup>3</sup>.

Con la metodología desarrollada, en este trabajo se ha calculado la probabilidad de falla de pórticos sismorresistentes típicos, diseñados según el Reglamento INPRES-CIRSOC 103, de 5 y 10 pisos ubicados en zonas sísmicas 3 y 4, con suelo de características intermedias.

El análisis de los resultados y las conclusiones correspondientes se realizan, conservativamente, poniendo énfasis en el aspecto comparativo.

## DESCRIPCION DEL METODO

1. Determinación o elección de la zona sísmica y de las condiciones locales del suelo, según el Reglamento INPRES-CIRSOC 103 y diseño de la estructura sismorresistente, incluyendo su armadura, según las prescripciones reglamentarias.

### 2 Demanda:

2.1 Caracterización probabilística de la acción sísmica.

La acción sísmica es modelada por procesos Gaussianos estacionarios equivalentes, con valor medio nulo, los cuales son caracterizados por las respectivas funciones de densidad espectral de potencia de la aceleración del suelo,  $S_{a_g a_g}(\omega)$ , construidas a partir de los espectros de respuesta reglamentarios.<sup>6-7</sup>

2.2 Caracterización probabilística del desplazamiento máximo demandado, en la cima.

Se realiza, asumiendo comportamiento idealmente elástico lineal, utilizando la función de transferencia que permite calcular la función de densidad espectral de potencia de dicho desplazamiento a partir de  $S_{a_g a_g}(\omega)$ .

$$S_{a_g a_g}(\omega) \rightarrow S_{vv}(\omega)^5$$

En la función de transferencia es necesario aplicar los primeros modos y frecuencias naturales de vibración, en la cantidad de modos que resulte necesario de acuerdo con la precisión deseada.

Siendo la acción sísmica un proceso Gaussiano, la respuesta, desplazamiento en la cima, es también Gaussiano y  $S_{vv}(\omega)$  caracteriza completamente a este proceso.

2.3 Función de distribución de probabilidad del desplazamiento pico requerido en la cima.

En el análisis de la distribución de valores extremos del proceso de respuesta se han realizado diferentes aproximaciones para obtener la función de distribución de probabilidad de la variable pico, es decir la

probabilidad que los valores pico de desplazamientos requeridos en la cima sean menores o iguales a  $v_e$  en el tiempo  $t$  de duración del evento.<sup>8-9</sup>

Resulta:

$$F_{V_e}(v_e) = P(V_e \leq v_e) = (1 - \exp(-\frac{\eta^2}{2})) \exp(-2v_0 t \frac{1 - \exp(-\sqrt{\frac{\pi}{2}} \delta_e \eta)}{1 - \exp(-\frac{\eta^2}{2})} \exp(-\frac{\eta^2}{2})) \quad (1)$$

siendo:

$$\eta = \frac{v_e}{\sigma_v}, \quad \sigma_v = m_0^{1/2}, \quad v_0 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2}$$

$$\delta_e = \left(\left(1 - \frac{m_1^2}{m_0 m_2}\right)^{1/2}\right)^{1,2}, \quad m_j = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^j S_{vv}(\omega) d\omega, \quad j = 0,1,2$$

Donde  $v_e$  es el desplazamiento extremo,  $\eta$  el valor extremo adimensional,  $\sigma_v$  el desvío standard del proceso de respuesta,  $v_0$  la razón esperada de cruces cero-positivo,  $\delta_e$  el parámetro de dispersión y  $m_j$  los momentos espectrales del proceso de respuesta.

Se adopta  $t = 21$  S, para la duración equivalente de la acción sísmica, considerada como proceso estacionario.<sup>3</sup>

Los desplazamientos extremos en la cima de estructuras sismorresistentes planas con comportamiento elastoplástico pueden asumirse iguales a los obtenidos con comportamiento elástico cuando el período del modo fundamental de vibración es largo y se encuentra en el rango de pseudo-velocidad constante del espectro de respuesta.<sup>10</sup>

Las estructuras analizadas con la metodología aquí presentada deben tener esta característica.

### 3 Suministro:

Se calcula el máximo desplazamiento disponible en la cima,  $v_D$ .

Para ello se realiza un análisis estático, con no linealidad física, incremental monótono creciente (push-over), utilizando, en la suposición de preponderancia del primer modo en la respuesta, una distribución de cargas de piso en correspondencia con la forma del mismo.

En este trabajo se usó un modelo no lineal, para pórticos sismorresistentes de hormigón armado<sup>11</sup>, aplicando como condición última, en las secciones plastificadas, el valor de la curvatura asociada con la ocurrencia de una de las siguientes condiciones: falla de los estribos de confinamiento, pandeo de la armadura comprimida, rotura de la armadura traccionada o deformación última del hormigón comprimido.

### 4 Cálculo de la Probabilidad de falla:

Con el desplazamiento requerido  $V_e$  caracterizado probabilísticamente por la ecuación (1) y el desplazamiento disponible  $v_D$  la probabilidad de falla, condicionada a la aceleración máxima del suelo, resulta:

$$P_f(a_s) = 1 - F_{V_e}(v_D) \quad (2)$$

La función de densidad espectral de potencia está relacionada con la aceleración pico del suelo  $a_s$  :

$$S_{a_g a_g}(\omega) = a_s^2 S_{a_g a_g}^*(\omega) \quad , \quad (3)$$

donde  $S_{a_g a_g}^*(\omega)$  es la función de densidad espectral de potencia para  $a_s = g$ , la aceleración de la gravedad.

En la ecuación (3)  $a_s$  es expresada como una fracción de  $g$ .

Se considera a  $a_s$  como una variable aleatoria, representativa de la variabilidad de la aceleración pico del suelo en una zona sísmica dada, para un período de 50 años. Su función de distribución de probabilidad puede asumirse como de valores extremos tipo II.<sup>12-13</sup>

$$F_{A_s}(a_s) = \exp\left(-\frac{u}{a_s}\right)^k, \quad (4)$$

donde:  $u = 0,376a_n$ , siendo  $a_n$  la aceleración pico del suelo, con un 10 por ciento de probabilidad de excedencia en 50 años y  $k = 2,3$ .<sup>3</sup>

Luego, la respuesta del sistema  $S_{vv}(\omega)$  es una función de  $a_s^2$  y la probabilidad de falla, para un período de 50 años, será:

$$P_f = \int_0^{\infty} P_f(a_s) \cdot dF_{A_s}(a_s), \quad (5)$$

donde  $P_f(a_s)$  es la probabilidad condicionada de falla para un valor genérico  $a_s$ .

La integral de la ecuación (5) es evaluada numéricamente.

## APLICACIONES

Con la metodología descripta se calcula la probabilidad de falla de cuatro pórticos sismorresistentes de hormigón armado, diseñados según el Reglamento INPRES-CIRSOC 103, dos de ellos de 5 y 10 pisos, ubicados en zona sísmica 3 y los otros dos, de igual cantidad de pisos que los anteriores, ubicados en zona sísmica 4.

Para todos ellos se ha asumido suelo tipo II, según el reglamento mencionado y materiales hormigón H-17 y acero ADN 420, según el Reglamento CIRSOC 201.

Las características de estos pórticos se muestran en las figuras n<sup>os</sup> 1 a 4.

En la figura n<sup>o</sup> 5 se encuentran los resultados de la respuesta no lineal y en las figuras n<sup>os</sup> 1 a 4 se han indicado las posiciones de las rótulas plásticas y la ductilidad de curvatura desarrollada en cada una, destacando la rótula de falla.

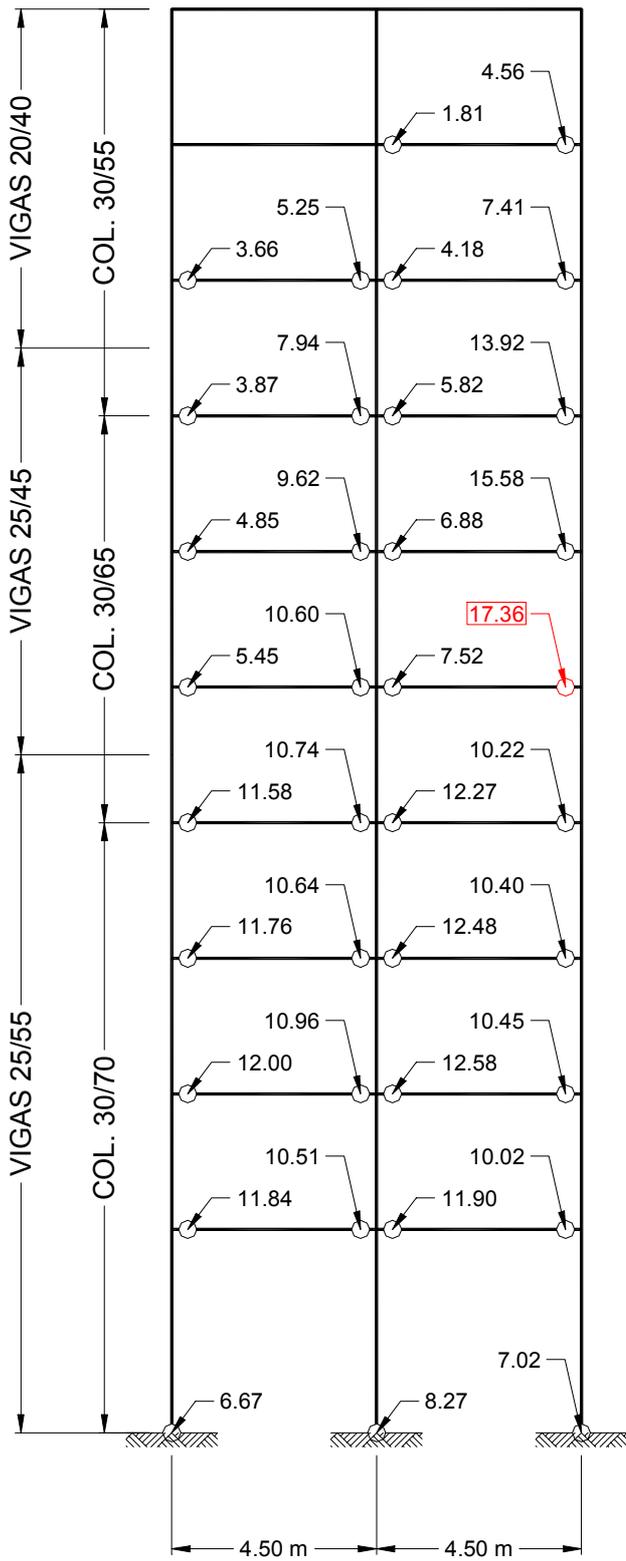


Figura nº 1 – Pórtico de 10 pisos Zona 3

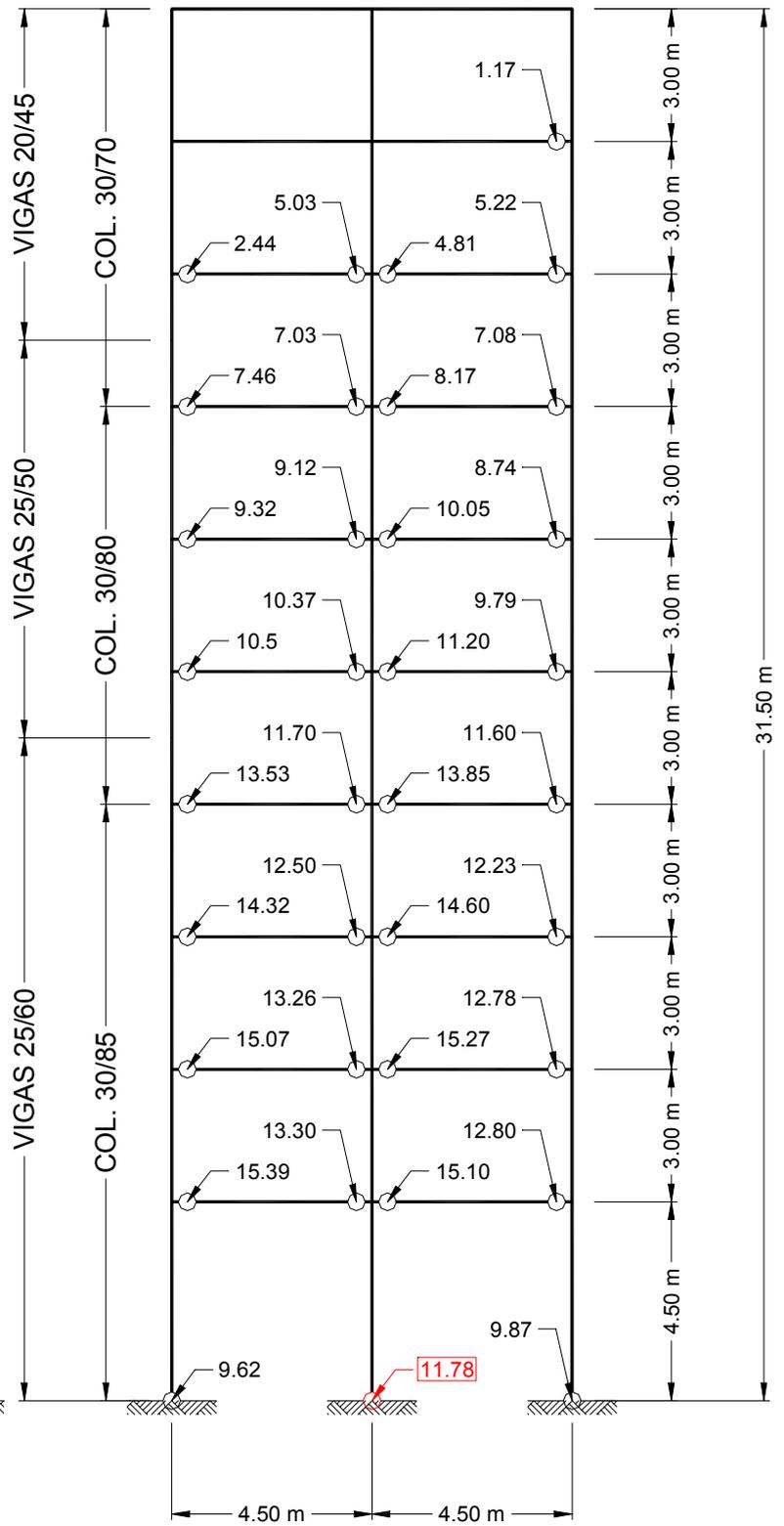


Figura nº 2 – Pórtico de 10 pisos Zona 4

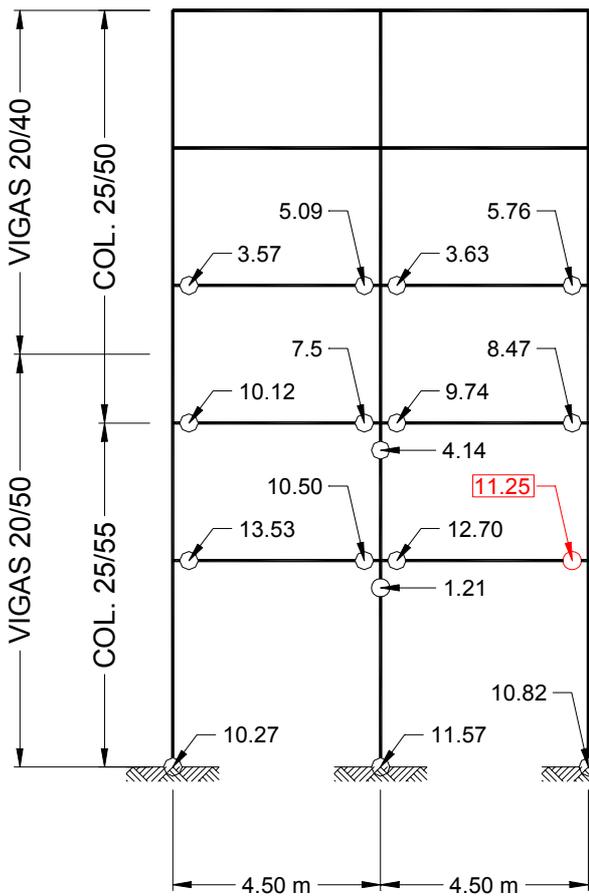


Figura nº 3 – Pórtico de 5 pisos Zona 3

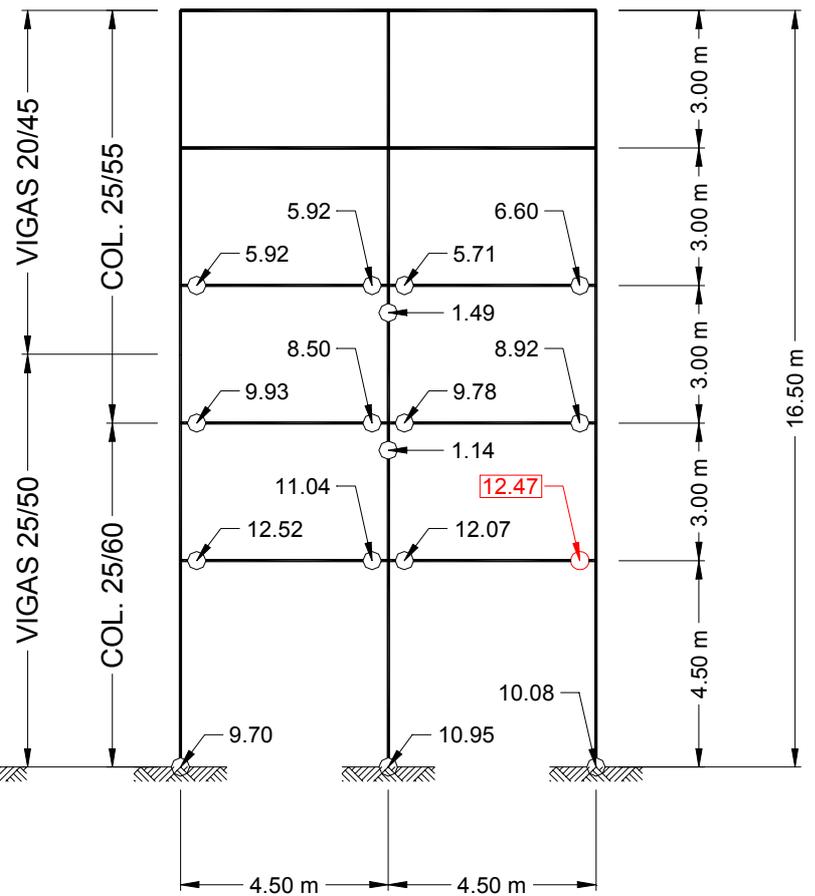


Figura nº 4 – Pórtico de 5 pisos Zona 4

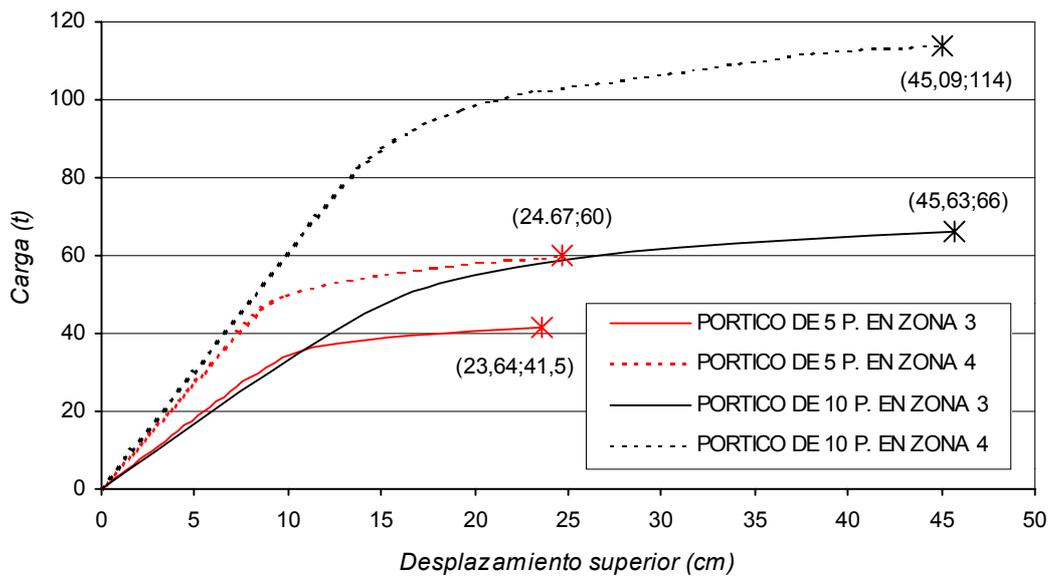
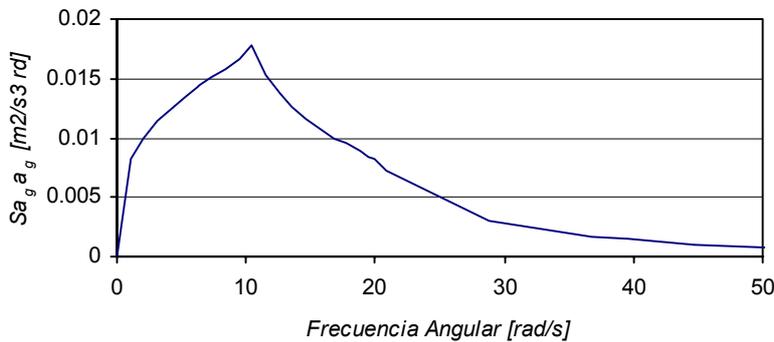


Figura nº 5 – Comportamiento no lineal



En la figura nº 6 se observa la función de densidad espectral de potencia (FDEP) de las aceleraciones en el suelo, construida a partir del espectro de respuesta en pseudoaceleraciones reglamentario, para zona sísmica 3 y en las figuras nº 7a y 7b se muestran las FDEP de los desplazamientos en la cima para los pórticos de 5 y 10 pisos, respectivamente, donde puede observarse la marcada preponderancia, en la respuesta estructural, del modo fundamental.

Figura 6 – FDEP de las aceleraciones en el suelo

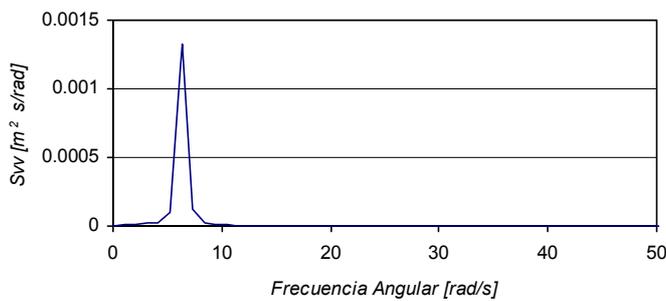


Figura 7 a – FDEP de los desplazamientos en la cima (Pórtico de 5 pisos)

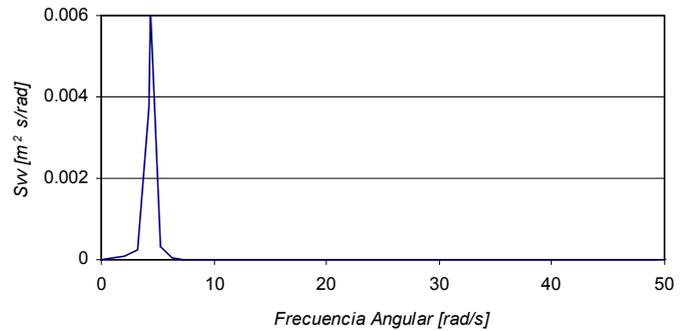


Figura nº7 b – FDEP de los desplazamientos en la cima (Pórtico de 10 pisos)

Finalmente en las figuras nº 8a y 8b se observan las funciones de distribución de la probabilidad de falla condicionada a la aceleración del suelo y las funciones de densidad de probabilidad de la aceleración del suelo correspondiente, que permiten calcular, aplicando la ecuación (5), la probabilidad de falla total, para un período de 50 años, para cada pórtico.

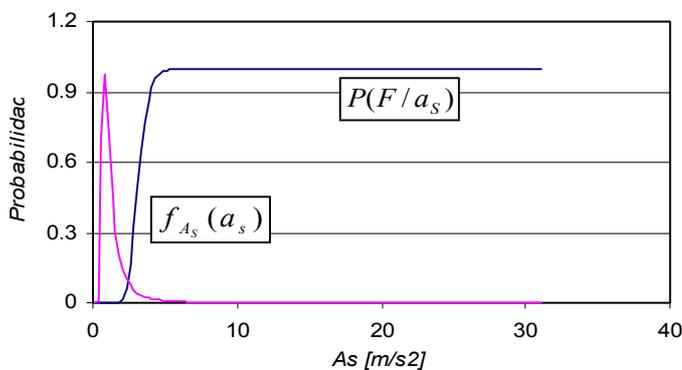


Figura 8 a – Pórtico de 5 pisos

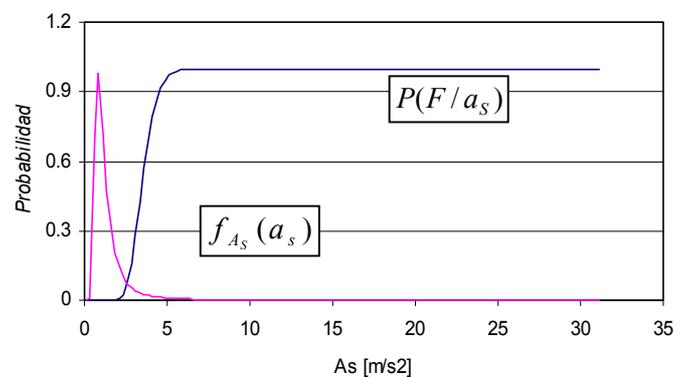


Figura 8 b - Pórtico de 10 pisos

Análogamente en figuras n<sup>os</sup> 9 a 11b se observan los resultados que se acaban de describir, pero para la aplicación en zona sísmica 4.

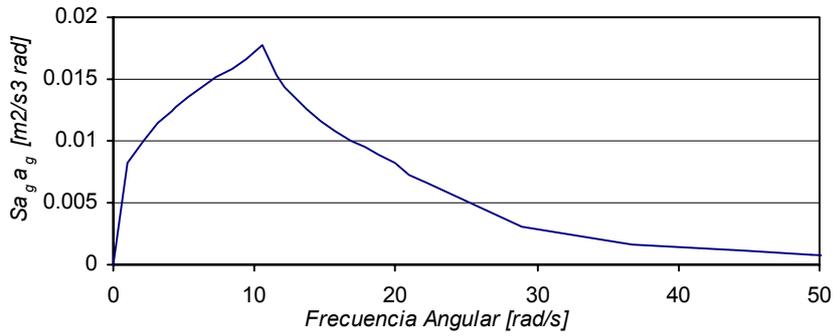


Figura 9 – FDEP de las aceleraciones en el suelo

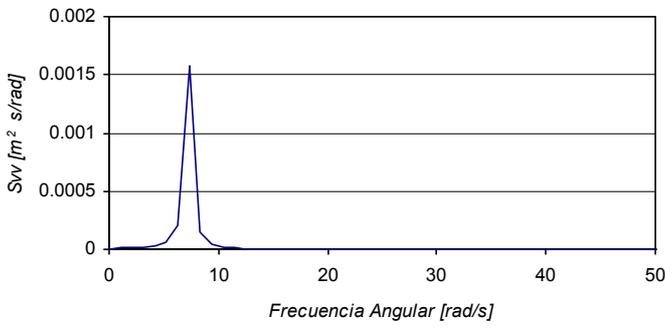


Figura 10 a – FDEP de los desplazamientos en la cima (Pórtico de 5 pisos)

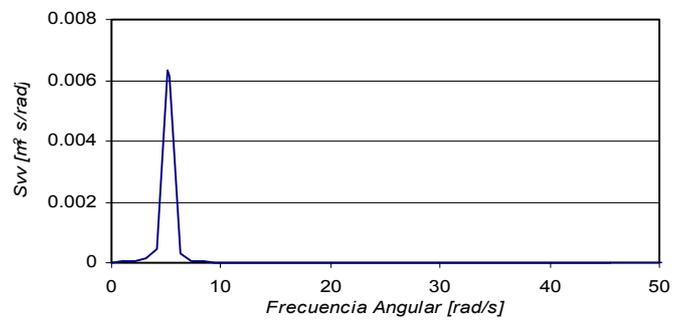


Figura n°10 b – FDEP de los desplazamientos en la cima (Pórtico de 10 pisos)

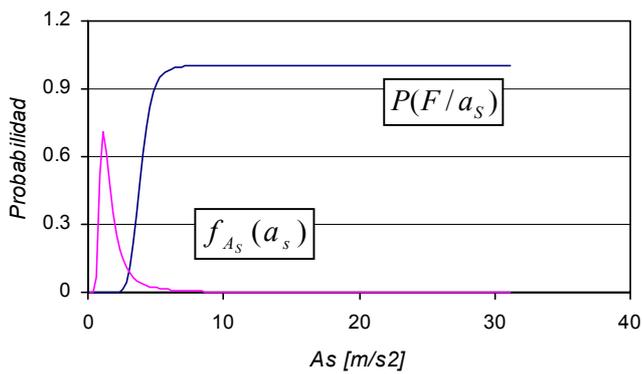


Figura 11 a - Pórtico de 5 pisos

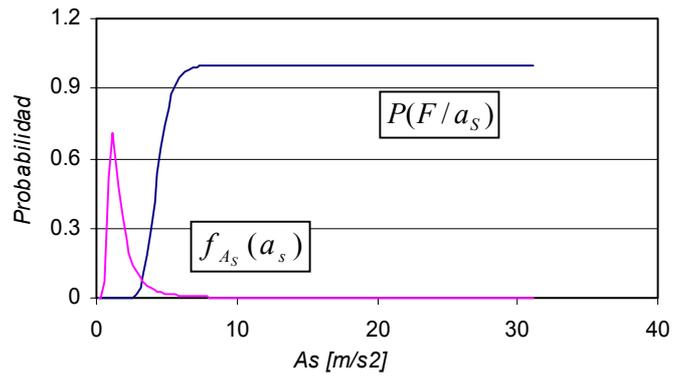


Figura 11 b - Pórtico de 10 pisos

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Probabilidad de falla para un período de exposición sísmica de 50 años

Zona sísmica	Pórtico de 5 pisos	Pórtico de 10 pisos
3	6,32 %	5,00 %
4	8,17 %	6,06 %

Se observa que, en ambas zonas, se obtuvo una mayor probabilidad de falla para los pórticos de 5 pisos, con respecto a los pórticos de 10 pisos, hecho que puede atribuirse a una menor difusión de las rótulas plásticas, como puede observarse en las figuras n<sup>os</sup> 1 a 4.

También se observa que la probabilidad de falla es ligeramente mayor en zona 4, con respecto a zona 3.

Como dato adicional cabe agregar que para un valor aproximadamente promedio de los resultados obtenidos, igual a 6 %, resulta una probabilidad de falla anual igual a  $12 \times 10^{-4}$ , bajo la suposición que los eventos sísmicos constituyen un proceso de Poisson. Los valores sugeridos en la literatura son del orden de 2 a  $4 \times 10^{-4}$ .<sup>4</sup>

## CONCLUSIONES

Con la metodología propuesta en este trabajo se ha analizado la probabilidad de falla, para un período de 50 años, de pórticos sismorresistentes de hormigón armado, de 5 y 10 pisos, diseñados según el Reglamento INPRES-CIRSOC 103, en zonas sísmicas 3 y 4.

Los resultados obtenidos muestran, comparativamente, una homogeneidad que resulta interesante de destacar para un código que no fue expresamente calibrado probabilísticamente.

El valor promedio calculado para la probabilidad de falla anual resulta ligeramente elevado para la práctica corriente, en ingeniería estructural, pero debe ser tomado con precaución, por resultar de un número reducido de ejemplos.

## REFERENCIAS

- [1] Palle Thoft – Christensen, M. J. Baker, “Structural Reliability Theory and Its Applications”. Springer-Verlag, 1982.
- [2] Reglamento Argentino de Acciones Sísmicas, INPRES-CIRSOC 103, Partes I y II.
- [3] Möller, O., Rubinstein, M., “Reliability-Based Design of R/C Water Tank Structures Under Seismic Action”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, 665-678 (1992), John Wiley and Sons, Ltd.
- [4] Paulay, T., Priestley, M. J. N., “Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings”, John Wiley and Sons, 1992.
- [5] Clough, R.W., Penzien, J., “Dynamics of Structures”. Mc Graw Hill Kogakusha, Ltd., 1975.
- [6] C. Sundararajan and G.D. Gupta, “An integral equation approach for the generation of seismic power spectral density functions”, J.press.vess.technol. ASME 102, 264-270 (1980).
- [7] D.D. Pfaffinger, “Calculation of power spectra from response spectra”, J.eng.mech.div. ASCE 109, 357-372 (1983).

- [8] E.H. Vanmarcke, "Properties of spectral moments with applications to random vibrations", *J.eng.mech.div. ASCE* 98, 425-446 (1972).
- [9] E.H. Vanmarcke, "On the distribution of the first-passage time for normal stationary random processes", *J.appl.mech. ASME* 42, 215-220 (1975).
- [10] A.S. Veletsos and N.M. Newmark, "Effect of inelastic behaviour on the response of simple systems to earthquake motions", *Proc. 2<sup>nd</sup>. world conf. earthquake eng. Tokyo* 27, 895-912 (1960).
- [11] Möller, O., Etse, J.G., Giuliano, A.P., Rubinstein, M., "Computational Analysis of Non Linear Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Frames", *Computational Mechanics, New Trends and Applications*, E. Oñate and S.R. Idelsohn (Eds.) CIMNE, Barcelona, Spain, 1998.
- [12] Dong, W.M., Shah, H.C., "Reliability assessment of existing buildings subjected to probabilistic earthquake loadings", *4<sup>th</sup> Int. conf. struct. safety reliability ICOSSAR 85 I*, 567-571 (1985).
- [13] O'Connor, J.M., Ellingwood, B., "Reliability of nonlinear structures with seismic loading", *J.struct. eng. ASCE* 113, 1011-1028 (1987).