

# Comentarios Sobre el Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes

## (Decreto 1400 de junio 7 de 1984)

Por: Gabriel García Moreno\*

A partir del primero de Diciembre de 1984, entra a regir el "Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes", que un grupo de ingenieros de la AIS (Asociación de Ingeniería Sísmica con sede en Bogotá) y algunos otros profesionales del país, y de la Universidad de Los Andes, elaboraron por encargo del Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Dicho código es de seguimiento obligatorio y su imposición rápida y sin mucha difusión, impidió ser discutido, medido, y estudiado, con profundidad.

Nosotros hemos dedicado algún tiempo a mirarlo y a sopesar algunas de sus implicaciones en el análisis y diseño, y a compararlo con las normas del ACI-318-83, que como sus autores lo reconocen, fue la guía del nuevo código.

No dudamos que el ACI-318-83 es el mejor código del mundo, y de hecho ha sido el código al cual nos hemos ceñido los ingenieros colombianos por muchas décadas: está soportado por el país que más gasta en investigación en el mundo: Estados Unidos; es claro, conciso y económico. Además es simple y seguro, condiciones éstas que, juzgo yo, son las más importantes que deben llenar los conjuntos normativos de la actividad profesional.

Pero al trasladar este buen conjunto de reglas a nuestra sufrida comarca, se han modificado algunas normas, con lo cual se ha complicado, extraordinariamente, en algunos casos, la aplicación del Código Colombiano. Ya antes había sucedido esto con la norma ICONTEC 2000, la cual había variado, inexplicablemente y contra toda evidencia matemática, sin soporte estadístico, sin estudios confiables, los coeficientes de mayoración de 1,7 para cargas vivas a 2,0 y de 1,4 para cargas muertas a 1,5. Esto se hizo sin modificar los coeficientes de minoración de resistencia.

Este error fue corregido en el nuevo código, el cual regresó al 1,7 y 1,4 del ACI-318. Pero se deslizaron algu-

nos errores e incongruencias que creemos deben corregirse.

Vamos a mirar lo que hemos podido detectar con un vistazo rápido, y sin profundizar mucho en el conjunto de cambios y disposiciones diferentes. Hemos dividido el análisis en varios aspectos:

### LENGUAJE Y PRESENTACION, METODOLOGIA Y PARTE TECNICA, COMENTARIOS FINALES

I) LENGUAJE Y PRESENTACION: Es éste un aspecto muy importante y que influye hondamente en el ámbito cultural y científico, ligándonos o desligándonos de determinadas culturas científicas y técnicas. El lenguaje que emplea el código es sencillo y llano, sin muchas complicaciones en su sintaxis. Pero desgraciadamente emplea una cantidad de términos inadecuados, introducidos por los mexicanos, y algunos otros localismos colombianos, que pueden crear ambigüedades cuando se quiere comunicar la idea con precisión, especialmente en las relaciones con otros países de habla hispana, y de cultura técnica más avanzada que la nuestra, vg. España, Argentina, Chile, Uruguay e incluso Paraguay, en algunos aspectos.

Los mexicanos, sumergidos en una marea de información y documentación, provenientes del inglés, optaron por traducir literalmente algunos términos, que ya tenían su correspondiente denominación española. Divulgaron estos términos por medio de su literatura técnica, en la cuenca del Caribe y contribuyeron así a crear en algunas ramas, del Hormigón Armado, y especialmente del Hormigón Pretensado, una serie de malentendidos y ambigüedades. Veamos y discutamos algunos de ellos:

CONCRETO: (Inglés CONCRETE; España, Argentina, Chile, Uruguay y Paraguay: HORMIGON). Esta palabra está muy difundida en la cuenca del Caribe: Centro América, Colombia, Venezuela.

Pero hay una fuerte reacción en Puerto Rico, Costa Rica y en algunas Universidades e instituciones colombianas (Facultad Nacional de Minas, ICONTEC, etc.).

\* Profesor Titular. Profesor Emérito, Facultad Nacional de Minas.

Efectivamente, en la Facultad de Minas, un grupo de profesionales, entre los cuales se cuenta el que esto escribe, ha venido luchando activamente contra la utilización del término, que contribuye a crear ambigüedades innecesarias en el idioma, pues ya existe el adjetivo CONCRETO en español, e inclusive existe el verbo CONCRETAR con acepciones definidas. ¿Qué tal por ejemplo decir: hablemos CONCRETO EN CONCRETO? Definitivamente es mejor adoptar el término de la mayoría hispano parlante.

ESFUERZO por decir TENSION: ( $\sigma = \frac{dF}{dA}$ ; español: TENSION; Inglés: STRESS; Francés: TENSION o CONTRAINTE; Portugués: TENSAO; Mexicano: ESFUERZO). Pero en español ESFUERZO significa: ES= prefijo que quiere decir "sale de", y FUERZO= fuerza: FUERZA INTERNA. En el mismo sentido se usa en Francés: EFFORT y en Inglés: EFFORT. Es pues muy raro el origen del término para designar TENSION, ya que esta palabra ha dado origen en español a la palabra TENSOR con la cual se designa al conjunto de las TENSIONES que se crean alrededor de un punto en el interior de un sólido. Lo más grave es que en MECANICA, ELASTICIDAD, HORMIGON ARMADO, etc. se utiliza ampliamente la palabra ESFUERZO para denominar a las FUERZAS INTERNAS, en oposición a las EXTERNAS AL SOLIDO. Así se hace en ESPAÑOL, FRANCES, PORTUGUES, etc. (en todas las lenguas romances) con excepción del dialecto que se ha extendido en Colombia.

Pero por ley de arrastre, este error se prolonga utilizando la palabra TENSION por TRACCION.

TENSION por decir TRACCION: (la TRACCION es una calidad de la TENSION, que significa que las partículas se ven sometidas a fuerzas unitarias de separación, y opuesta a la acción de COMPRESSION, en la cual las partículas del sólido se ven sometidas a una acción de apretamiento).

En el HORMIGON PRETENSADO, el dialecto técnico que se usa en Colombia introduce una serie de malentendidos, ambigüedades e imprecisiones, especialmente cuando se quiere denominar a la técnica del PRETENSADO PRETRACCIONADO o al PRETENSADO POSTCOMPRIMIDO.

LUZ por CRUJIA: es una costumbre menos grave que las anteriores, y lo mismo podemos decir de la utilización del término MAGNIFICACION por MAYORACION.

II) METODOLOGIA Y PARTE TECNICA: Empezaremos por analizar la parte en la cual el código da las

pautas para considerar el riesgo sísmico y las deducciones de los parámetros Aa y Av que dan origen a los espectros de diseño. La deducción de estos dos parámetros se hizo siguiendo un estudio de sismicidad basada en la actividad sísmica de las fallas geológicas del país, según un modelo cuyo autor es Der Kiureghian<sup>1</sup>. El método exige la comprobación y determinación experimental de los movimientos geológicos de tales fallas y de la magnitud de los movimientos sísmicos correlativos.

Es obvio que en Colombia tal sistema instrumental no existe y por consiguiente la deducción de la sismicidad basada en hipótesis elaboradas arbitrariamente, tal como lo confiesan palatinamente sus autores<sup>2</sup>, posee un alto grado de incertidumbre. Además, hay que tener presente que numerosos autores, quizás los más importantes especialistas en el tema, tales como: Newmark y Rosenblueth<sup>3</sup>, Clough y Penzien<sup>4</sup>, Okamoto<sup>5</sup>, Crempien y Saragoni<sup>6</sup>, Arias y Husid<sup>7</sup>, Jennings<sup>8</sup>, Hudson<sup>9</sup>, Housner y Jennings<sup>10</sup>, Lin<sup>11</sup>, desestiman la determinación del riesgo sísmico a partir de fallas geológicas, los unos explícitamente, como Newmark, Rosenblueth<sup>3</sup>, quienes aconsejan seguir un método estadístico utilizando el análisis bayesiano, y los otros aconsejando un análisis estocástico de procesos estacionarios modulados para la determinación de los espectros de diseño.

Se deduce, inmediatamente que ante la incertidumbre e irreabilidad de los parámetros de riesgo sísmico, se pierde la utilidad del empleo de un método más riguroso como el del ATC-3, que es el modelo seguido por el Código Colombiano. Además no se ha utilizado de aquél la parte más importante: la interacción suelo-estructura.

En aras de la simplicidad y dado que las incertidumbres son del mismo orden hubiera sido más aconsejable utilizar el U.B.C<sup>12</sup> o el S.E.A.O.C que es el empleado por la PCA<sup>13</sup>. Hay que tener presente que éste es el código que hemos seguido la mayor parte de los ingenieros colombianos, durante mucho tiempo. Durante los últimos años los ingenieros hemos calculado con el UBC o el S.E.A.O.C. ¿Cuáles son los resultados que se han obtenido? Aparentemente, las edificaciones diseñadas con estos métodos se han comportado excelentemente, según informes americanos y según estudios verificados por nosotros después del sismo del 79<sup>14</sup>.

El método del código colombiano, da esfuerzos corrientes en la base, del orden del 50% más altos que los del UBC. ¿Se justifica este sobrecosto?

Pero la parte que más problemas presenta es la concerniente al Hormigón Armado. Damos a continuación una lista, con algunos comentarios, de las principales observaciones que tenemos sobre algunos temas:

10.) La objeción más importante que tenemos es la que toca con la determinación de la inestabilidad elástica de los pilares. El código colombiano, en forma aproximadamente igual al ACI, calcula los efectos de esbeltez por medio de dos factores de amplificación: Uno para cargas axiales mayoradas  $\delta_e$  y otro,  $\delta_g$ , para cargas laterales igualmente mayoradas.

El ACI calcula estos factores de amplificación por el método tradicional con algoritmos de la forma

$$(\delta_e) \delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{\phi P_c}} \quad (1) \quad C_m = 0,6 + 0,4 \frac{M_1 b}{M_2 b} \geq 0,4$$

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(k \ell_n)^2} \quad (3)$$

$$(\delta_g) \delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u}{\phi \sum P_c}} \quad (2) \quad \sum P_u = \text{suma para todos los pilares del piso en consideración.}$$

$\sum P_c$  = Suma de todas las cargas críticas (3) para todo el piso.

El factor de longitud eficaz  $k$  se calcula independientemente para ambos casos con el pilar arriostrado en (1) y con los pilares del piso no arriostrados en (2); aunque es posible en (2) tener pilares arriostrados no debe tomarse nunca  $k$  menor de 1 en la ec. (2). El ACI recomienda, para el cálculo de  $k$ , los ábacos de Jackson-Moreland o las fórmulas de Furlong; además recomienda el cálculo de un índice de estabilidad.

$$Q = \frac{\sum P_u \Delta u}{H_u h_s} \leq 0,04,$$

para decidir cuando una estructura se puede considerar arriostrada.

$H_u$  = carga lateral total mayorada en el piso.

$\Delta u$  = deformación lateral elástica de primer orden debida a  $H_u$ .

El método del ACI, es práctico, expedito y simple en el diseño, y es bastante aproximado si se calcula apropiadamente la carga crítica  $P_c$  en la ec. (3). Pero el empleo de los ábacos de Jackson-Moreland, o de las fórmulas de Furlong introduce una probabilidad notoria de error<sup>15,16</sup>. Nosotros hemos demostrado<sup>15</sup>, que si se utiliza el GDE (Grado de Empotramiento) en el cálculo de las cargas críticas  $P_c$  el factor  $\delta_s$  puede conservar su fórmula algorítmica, con resultados bastante buenos. El otro problema que presenta es el cálculo del índice de estabilidad  $Q$ , que exige el conocimiento previo, en la etapa de predise-

ño, de  $\Delta u$ , el cual exige a su vez el conocimiento de las rigideces laterales. Es pues un problema de ensayo y error. Si se utiliza la fórmula (3) y se calculan los  $K$  por el método de Jackson-Moreland el calculista puede a veces encontrarse con sorpresas desagradables<sup>15, 16</sup>. El GDE resuelve el problema.

El código colombiano conserva las fórmulas (1), (3) para las cargas que no producen desplazamiento lateral y cambia la fórmula (2) por

$$(\delta_s) \delta_g = \frac{1}{1 - Q} \quad (4)$$

El índice de estabilidad sirve aquí igualmente para decidir sobre el arriostramiento (cuando  $Q \leq 0,1$ ), pero aquí el índice de estabilidad no es una recomendación, como en el ACI, sino una imposición para el cálculo de la ec. (4). Su cálculo alarga el proceso de diseño, indebidamente, para estructuras pequeñas, edificios de 5 pisos o menos, que son los más numerosos en nuestro medio.

No puede alegarse la mayor precisión de la fórmula (4) sobre la (2), pues aunque esto fuera cierto, la obligatoriedad de las (1), (3), le resta precisión al proceso y el factor  $K$ , del ACI, le da un grado de incertidumbre inusitado.

No nos explicamos por qué en ambos casos, en el ACI, y en caso del código colombiano, se ha ignorado nuestro trabajo del G.D.E. Nos lo explicamos en el caso del ACI, dada la renuencia de los americanos, para emplear un método latino. Pero no nos explicamos en el caso del código colombiano, por qué se ignora el trabajo de colombianos.

Estamos convencidos de que la utilización del GDE para el cálculo de  $P_c$  en (3), permite el empleo de las fórmulas (1) y (2), con excelentes resultados. Esto corrige las incertidumbres del ACI y permite diseñar en forma expedita y rápida. Además el GDE, permite también calcular el desplazamiento lateral  $\Delta u$  y el índice de estabilidad  $Q$ , tal como lo hemos demostrado en la referencia (15).

20.) Debe existir un error en el Artículo C.8.5.1, en el cual se da un valor para el hormigón de peso normal de

$$E_c = 13000 \sqrt{f'_c} \text{ en } \text{Kg/cm}^2 \quad (5)$$

En primer lugar no se define lo que el código entiende por hormigón de peso normal.

En segundo lugar no se sabe de dónde sale la expresión (5) para representar en sistema MKS (porque nos

imaginamos que éste es el sistema del código) a la fórmula empírica de Pauw<sup>17</sup>.

$$E_c = 33W_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \text{ (en psi)} \quad (6)$$

en donde el ACI define:

Hormigón ligero  $W_c = 90 \text{ lbs/pie}^3$

Hormigón normal  $W_c = 150 \text{ "}$

Reemplazando  $W_c = 150 \text{ lbs/pie}^3$  en la (6) nos da:

$E_c = 60.625\sqrt{f'_c} \text{ psi}$ , para hormigón de peso normal.

Poniendo este valor en sistema métrico MKS nos da

$$E_c = 16.217\sqrt{f'_c} \text{ kgf/cm}^2$$

Usualmente se toma:

$$E_c = 15.100\sqrt{f'_c} \text{ kgf/cm}^2 \quad (7)$$

Nosotros estamos dirigiendo una tesis de grado<sup>18</sup> en la Facultad de Minas, en la cual los resultados estadísticos obtenidos hasta el presente se escalonan desde

$$E_c = 14.200\sqrt{f'_c} \text{ kgf/cm}^2$$

hasta  $E_c = 16.000\sqrt{f'_c} \text{ "}$

lo cual comprueba que el valor dado por la ec.(7) se puede dar como la esperanza matemática del valor de  $E_c$  para hormigones normales en Colombia.

Un código normativo, expedido con gran despliegue publicitario y constituido en ley de la República, no puede dar valores experimentales de uso obligatorio sin acompañarlos de las referencias experimentales, condiciones y limitaciones de los valores dados. Lo contrario implica poca seriedad.

3o.) Siempre hemos creído que el sistema de pesos y medidas, vigente, y oficial en el país, es el sistema métrico decimal MKS (METRO, KILOGRAMO FUERZA, SEGUNDO), o sea en abreviatura internacional (m, Kgf, s). O sea que se diferencia el kilogramo fuerza (Kgf) del kilogramo masa (kgm). En el código colombiano todo es kg, y el código no define en ninguna parte qué sistema sigue. Por ejemplo en la fórmula (5), sabemos por analogía y "experiencia" que el sistema es MKS. ¿Pero qué pasa con los estudiantes sin experiencia?

4o.) El MKS utiliza un sistema de formación y de cálculo aritmético en base 10, cuya escritura internacional consiste en separar las partes decimales con coma, las unidades de mil con punto, las unidades de millón con números pequeños colocados a guisa de exponentes, v.g. así:

2<sup>1</sup> 345.558,835 Km (Kilómetros)

El sistema inglés también es decimal, en base 10, pero su escritura usual es así:

2,345,558.835 Miles (Millas)

El sistema del código colombiano es así:

2345558.835 Km (o Millas)

Ejemplo: la ec. (5) que en MKS sería

$$13.000\sqrt{f'_c}$$

o en inglés

$$13,000\sqrt{f'_c}$$

se escribe en el código

$$13000\sqrt{f'_c}$$

No es extraño ver expresiones como ésta también en la prensa y en la televisión:

2.345.558.835 Km

No se sabe cuál es la parte decimal.

En últimas: ¿qué sistema seguimos en Colombia?

5o.) Todo código debe ir acompañado de alguna suerte de documentos o comentarios explicativos que dé razón, claramente, de las hipótesis asumidas, la metodología seguida en su elaboración, y acompañar las referencias de los estudios y publicaciones en que basa sus normas.

En el caso del código colombiano no se conoce nada de esto. El caso de la ecuación (5) es una muestra típica de lo qué estamos diciendo.

6o.) No se entiende la filosofía del capítulo C-20 "Requisitos de concreto reforzado en zonas de riego sísmico intermedio"

¿Por qué razón no se hace necesario estudiar los nudos de los marcos en este caso, tal como se hace cuando hay riesgo sísmico alto? ¿Cuáles son los estudios o experimentos que sustentan la rebaja del confinamiento en las fórmulas (C.20-1) y (C.20-2)? Seguramente esto es muy peligroso, y francamente no le vemos fundamento, especialmente cuando, como en el presente caso, se ha optado por aumentar el % de redistribución de momentos, al 25%. (Sección C.8.2). Seguramente esto redundará en un porcentaje mayor de nudos fisurados. Decisiones como la presente se toman siempre en un buen respaldo experimental, nunca de oídas.

7o.) Respecto a la edición tenemos la siguiente observación: es imprescindible en un código de naturaleza técnica adicionarle un índice temático. Si esto no se hace, la consulta del manual se hace muy difícil. Aunque al parecer esto es precisamente el objetivo: hacerlo todo más difícil.

### III) COMENTARIOS FINALES

Un código de construcción, tal como el presente, debe ser un conjunto de normas mínimas, deducidas la mayor parte de ellas, en forma empírica o experimental, en tal forma que satisfaga los principios científicos básicos y las normas comprobadas de seguridad. Por lo tanto su seguimiento no puede ser obligatorio para aquellos profesionales que superen, mediante nuevos conocimientos o experiencias, y lo puedan demostrar, los principios en que se fundamenta el código. Pretender lo contrario, sería ponerle un bozal a la investigación científica aplicada.

En un país como el nuestro, en donde los famosos mandos medios, son personas, las más de las veces, poco avezadas en la técnica, es sumamente peligroso legislar en una forma tan cruda como la que muestran los artículos G.1 y G.2 del presente código.

Aunque el artículo G.1 empieza diciendo "Los ingenieros y arquitectos...", todo el mundo sabe que somos los ingenieros quienes llevamos el peso de la parte científico-técnica de la construcción, pues el arquitecto no se encuentra capacitado, por su formación, para sujetarse a normas con matiz matemático. Es pues inaceptable, para los ingenieros constructores y calculistas la redacción de los dos artículos mencionados, pues prácticamente nos dejan al arbitrio de la burocracia no muy conocedora de la técnica.

Es imprescindible, desde este instante, pedir al gobierno la revisión del presente decreto, instándolo a revisar también el código, aclarando primero que todo en qué idioma o dialecto se escribe: si dialecto mexicano-colombiano, o español; en qué sistema se basa: si métrico decimal: MKS o SI (Sistema internacional) o sistema métrico-anglo-colombiano, en tal caso, convendría reglamentar este último, lo cual se puede hacer también por decreto presidencial.

### REFERENCIAS

- 1) DER KIUREGHIAN. "A fine source model for seismic risk analysis". University of Illinois, October 1975. Structural Series No. 419.
- 2) SARRIA M. ALBERTO. "Tectónica y sismicidad colombiana". Seminario sobre el riesgo sísmico en Colombia y el primer código sismo-resistente colombiano. Medellín - agosto 27 al 31. 1984.
- 3) H.M. NEWMARK, E. ROSENBLUETH. "Fundamentos de Ingeniería Sísmica". Traducción de J.L. Lepe de la obra "Fundamentals of Earthquake Engineering". Editorial Diana. México. 1976, pág. 278.
- 4) R.W. CLOUGH, J. PENZIEN. "Dynamics of structures". Mc Graw-Hill Book Company. 1975, pág. 543.
- 5) SHUNZO OKAMOTO. "Introduction to earthquake Engineering". John Wiley & Sons. University of Tokio press, 1973. pág. 49.
- 6) JORGE CREMPIEN, RODOLFO SARAGONI. "Influencia de la duración de movimientos sísmicos en la respuesta de estructuras elásticas". Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Publicación Ses 13/77(130) Septiembre 1977. Santiago - Chile. pág. 95.
- 7) ARIAS A, R. HUSID. "Influencia del amortiguamiento sobre la respuesta de estructuras sometidas a temblor". Revista del IDIEM, Vol 1, No. 3, pp. 219-228. Santiago, Chile. Diciembre 1962.
- 8) JENNINGS P.C. "Response of simple yielding structures to earthquake excitation". California Institute of Technology, Earthquake Engineering Research Laboratory. Ph. D., Thesis, Pasadena, California, June 1963.
- 9) D.E. HUDSON. "Response spectrum techniques in Engineering seismology". World Conference on Earthquake Engineering, paper 4-1, Berkeley California, June 1956.
- 10) G.W. HOUSNER, P.C. JENNINGS. "Generation of artificial earth - quakes". Journal of the Engineering Mechanic Division, ASCE. Vol 90. No. EM1, Proc. Paper 3806, February 1964.
- 11) Y.K. LIN. "Probabilistic theory of structural dynamics". Mc. Graw-Hill Book Company. 1967.
- 12) Uniform Building Code". International Conference of Building Officials, Whittier, 1982, 780 p.p.
- 13) "Notes on ACI 318-83. Building Code Requirements for Reinforced Concrete with Design Applications". Portland Cement Association, P.C.A. Fourth Edition Revised 1984.
- 14) GARCIA GABRIEL. "Informe de la comisión del sismo del 23 de noviembre, de la Facultad Nacional de Minas". III Simposio sobre Problemas Técnicos en las Construcciones (Patología de Estructuras). Sociedad Antioqueña de Ingenieros. Marzo 26, 27 y 28 de 1980. Medellín.
- 15) GARCIA GABRIEL. "Elastic lateral instability of columns studied by the degree of fixity method. (P - Δ EFFECT)" A.C.I. Journal, Proceedings V.78, No. 5, Sept-Oct. 1981, pp. 358-368.
- 16) S.M.A. LAI, J.G. MAC GREGOR, J. HELLESLAND. "Geometric nonlinearities in nonsway frames" Jnl. of Structural Engineering. A.S.C.E., Vol. 109, No. 12, Dec. 1983, pp. 2770-2785.
- 17) A. PAUW. "Static modulus of elasticity of concrete as affected by density". ACI Journal, Proceedings. V.32, No. 6, Dec. 1960, pp. 679-687.
- 18) H.D. PALACIO, L.A. RICO. "Evaluación de los módulos de elasticidad y de Poisson y de otras características en hormigones elaborados con materiales locales". Proyecto de Grado bajo la dirección del profesor Gabriel García. En ejecución. Facultad Nat. de Minas. Medellín.