

Acerca del uso de las formas espectrales de los códigos CCP95 y CCP14 en nuevos diseños estructurales o reforzamientos de puentes existentes

Gabriel Bernal Granados*

Gerente Técnico INGENIAR CAD/CAE Ltd.

Profesor Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia

Introducción

La infraestructura vial de Colombia ha tenido un desarrollo acorde con el nivel económico del país, con un ritmo que puede considerarse intermedio si se compara con el de otros países, y presentando algunos impulsos importantes como el que se dio con la cuarta generación de concesiones (4G). A lo largo de este tiempo, se han publicado por parte del INVIAS, con el acompañamiento técnico de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), dos normativas de diseño y construcción sismo resistente de gran importancia, una en 1995 y otra en 2014. En líneas generales, ambas normativas recogen suficientemente bien el estado del arte de la práctica en ingeniería sísmica estructural de sus correspondientes años de publicación. Sin embargo, existen diferencias importantes entre estos códigos, resultantes del avance normal de la ciencia y la ingeniería.

En esta nota, se compararán en particular las formas espectrales propuestas por el CCP95 y el CCP14, con el fin de mostrar las diferencias más relevantes y hacer un juicio acerca de la pertinencia del uso de estas formas espectrales, en particular las del CCP95, en procesos de diseño, rediseño o reforzamiento estructural de puentes en Colombia. También se incluye una propuesta que modifica las formas espectrales del CCP14 con el fin de darles mayor aplicabilidad y coherencia. Nos referiremos en esta nota únicamente a espectros de diseño de movimiento horizontal.

Comportamiento dinámico de osciladores de un grado de libertad

No se pretende en esta nota incluir conceptos de la dinámica estructural, simplemente referirnos a la definición de lo que es un espectro de respuesta. Lo que conocemos como espectro de respuesta no es más que la colección de valores máximos de movimiento (respuesta estructural) de osciladores de un grado de libertad con periodo fundamental variable (cubriendo un rango relevante y representativo), ante un mismo movimiento sísmico en la base.

Los espectros de respuesta proveen la esencia de la definición de los espectros de diseño incluidos en todas las normativas de diseño sismo resistente y, por lo tanto, la

* gabernal@ingeniar-risk.com. Noviembre de 2019.

interpretación que se le da a estos últimos debe ser coherente con la de sus antecesores. Los espectros de respuesta, entre muchas otras propiedades interesantes, exhiben un comportamiento como el ilustrado en la Figura 1. Se presenta un espectro de velocidad para el acelerograma registrado en la estación Bocatoma durante el sismo de Armenia (Eje Cafetero) del 25 de enero de 1999.

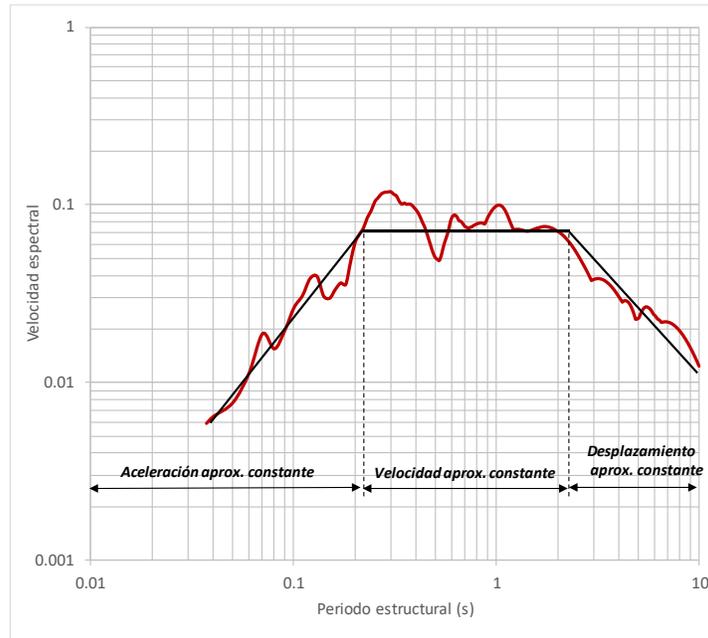


Figura 1. Espectro de velocidad del registro Bocatoma del sismo del Eje Cafetero (Colombia) del 25/01/1999

Nótese que, al dibujar los espectros de velocidad en escala logarítmica, es posible encontrar rangos de periodos en donde los valores calculados de respuesta estructural no varían significativamente unos con otros. En particular se revelan tres zonas en el espectro: una de aceleración aproximadamente constante, otra de velocidad aproximadamente constante y una tercera de desplazamiento aproximadamente constante. Las formas espectrales de diseño, similares a la línea negra presentada en la Figura 1, deben buscar aproximar lo mejor posible la forma y características de los espectros de respuesta.

Formas espectrales de diseño

Tanto el CCP95 como el CCP14 definen las ecuaciones para las formas espectrales de diseño a ser usadas en los procesos de cálculo estructural. El CCP95 contiene una de las formas espectrales más simplificadas. Tanto la amenaza en roca como la respuesta del suelo se definen por medio de un único parámetro. La ecuación que define el espectro de diseño CCP95 es:

$$S_a = \frac{1.2 \cdot A \cdot S}{T^{2/3}} \leq 2.5 \cdot A \cdot S$$

En donde A es el coeficiente de amenaza en roca (equivalente a la aceleración máxima del terreno) y S es el coeficiente de sitio, el cual puede variar entre 1.0 y 2.0 según la condición geotécnica.

Por su parte, el CCP14 incluye espectros de diseño que se definen por medio de seis parámetros: PGA , S_s , S_1 , F_{pga} , F_a y F_v . La Figura 2 muestra la forma funcional de los espectros de diseño dados por el CCP14.

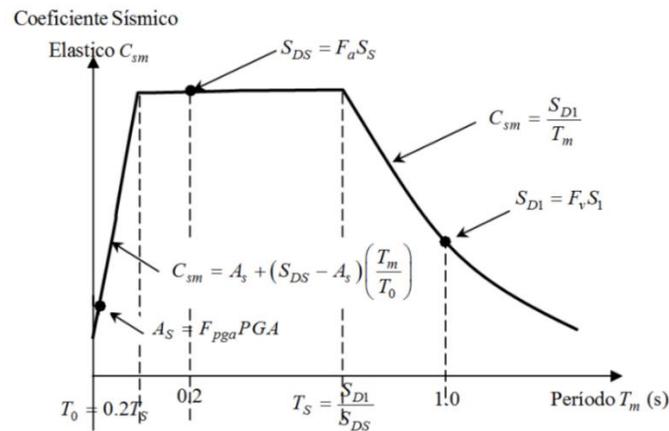


Figura 2. Espectro elástico de aceleraciones horizontales de diseño como fracción de g. (Tomado de CCP 14)

Con el fin de lograr una comparación objetiva, se seleccionó un punto en el país de forma arbitraria¹, para el cual se calculó la amenaza sísmica a nivel de roca firme, usando el mismo modelo de amenaza con el cual se definen los coeficientes de diseño en el CCP14². Del cálculo de la amenaza sísmica, se obtuvo el espectro de amenaza uniforme a nivel de roca firme en la Figura 3 (nótese que no es relevante conocer cuál es el periodo de retorno de dicho espectro dado que se quiere, únicamente, comparar formas espectrales de diseño). Este espectro es usado como base para la definición de coeficientes de diseño según las dos formulaciones a comparar: CCP95 y CCP14. Los parámetros más apropiados se definen siguiendo el procedimiento de ajuste propuesto por Bernal y Cardona (2015). La Figura 3 presenta los parámetros y los espectros de diseño resultantes, junto con el mencionado espectro de amenaza uniforme con fines comparativos. Nótese que todos los parámetros asociados a la respuesta del suelo se mantienen en un valor de 1.0.

En principio los espectros de aceleraciones ajustados y presentados en la Figura 3, no parecen muy diferentes, pudiéndose incluso afirmar que ambas formas espectrales representan suficientemente bien el espectro de amenaza uniforme. No obstante, al generar los espectros de velocidad y desplazamiento, se observa un comportamiento diferente a lo esperado y en general inconsistente con las características físicas de los temblores y de la respuesta de osciladores de un grado de libertad. La comparación se presenta en la Figura 4.

¹ El sitio seleccionado tiene coordenadas geográficas -73.5971 E , 4.1611 N

² El personal de INGENIAR hace parte del comité AIS-300 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, encargado de la amenaza sísmica para las normas nacionales, y fue el creador del modelo de amenaza sísmica empleado en el CCP14.

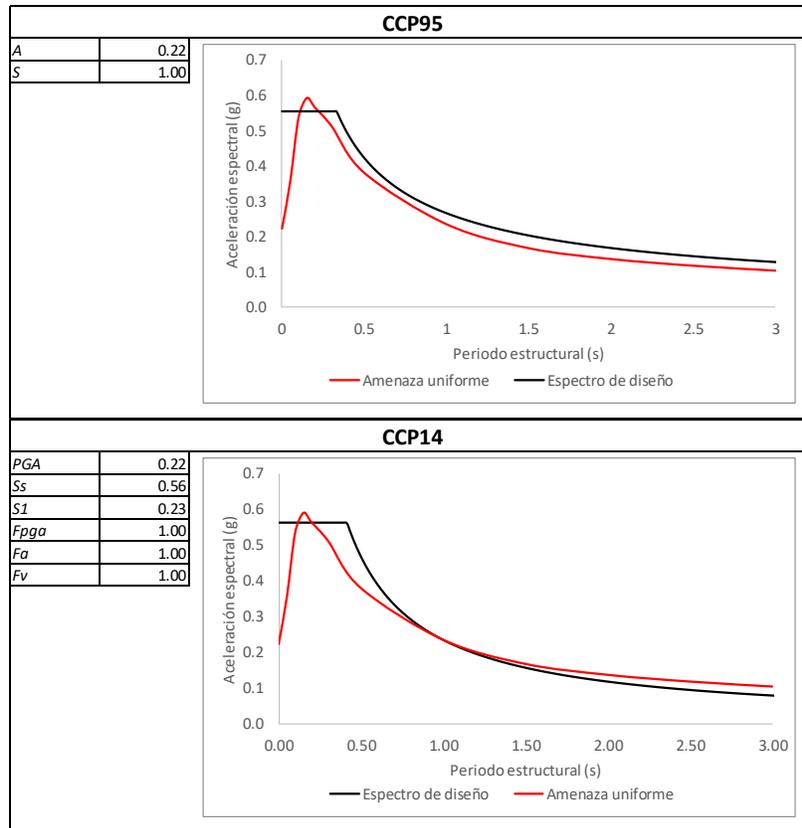


Figura 3. Espectros de diseño ajustados para la amenaza sísmica de 475 años de periodo de retorno, para un sitio seleccionado arbitrariamente en Colombia

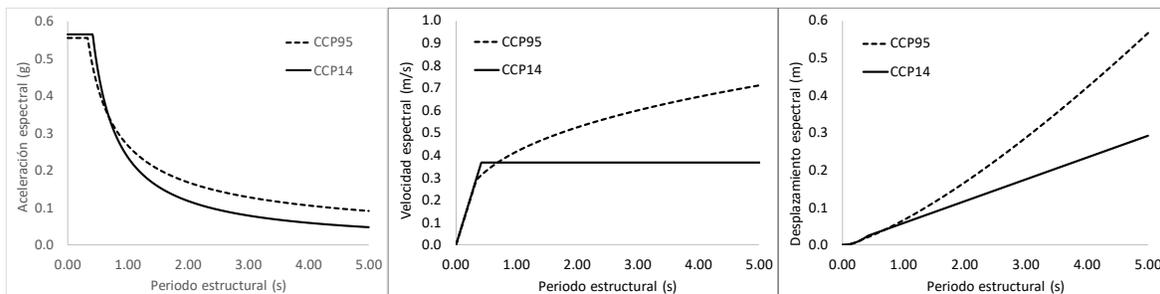


Figura 4. Espectros de diseño de aceleración (izq.), velocidad (centro) y desplazamiento (der.) calculados con las formas espectrales del CCP95 y el CCP14

Como puede verse en la Figura 4, las formas espectrales del CCP95 efectivamente incluyen una zona de aceleraciones constantes, pero no proveen de una zona de periodos con velocidad o desplazamiento constante. Esto se debe al decaimiento de la aceleración espectral con el inverso del periodo elevado a la 2/3, como puede verse en la formulación de esta forma espectral. Esto conlleva a que no se controlen los valores de velocidad para periodos intermedios, ni de desplazamiento para periodos largos.

Ahora bien, la forma espectral del CCP14 efectivamente es consistente con una zona de aceleraciones constantes en periodo corto y una zona de velocidades constantes en periodos intermedios y largos, sin embargo, no presenta tampoco una formulación

apropiada para el control de desplazamientos. A pesar de esta limitación es, al menos parcialmente, más coherente con la física del movimiento fuerte que la del CCP95.

Los códigos recientes incluyen una ecuación adicional para la definición de la forma espectral de diseño, válida a partir de un parámetro conocido como *periodo largo* (llamado típicamente T_L), a partir del cual las aceleraciones decrecen con el inverso del periodo al cuadrado. Esta formulación permite controlar los desplazamientos y llevar las formas espectrales a una representación más apropiada. Esta modificación puede incluirse fácilmente en la formulación de los espectros del CCP14, no siendo posible, sin embargo, su incorporación en la del CCP95. Para ilustrar el cambio, se incluyó dicha formulación en el espectro del CCP14 a partir de un $T_L = 4$ segundos. La Figura 5 muestra la comparación del CCP95 con el CCP14 modificado, para el sitio seleccionado, en términos de espectros de velocidad en escala logarítmica. Nótese las zonas de aceleración, velocidad y desplazamientos constantes correctamente definidas en esta nueva forma espectral.

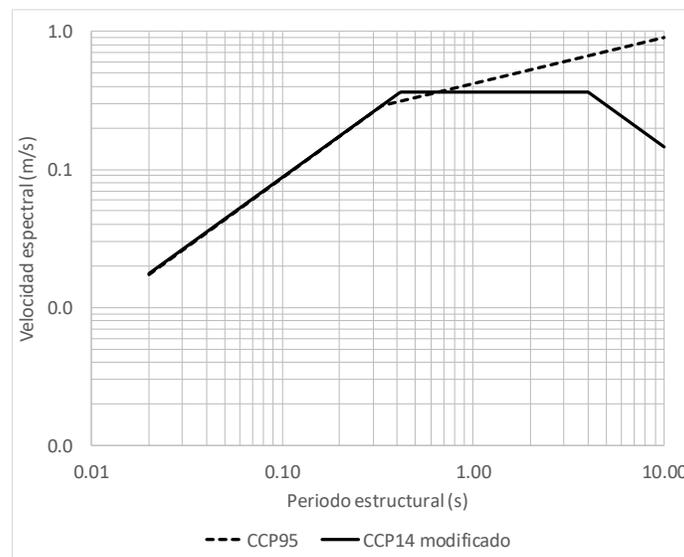


Figura 5. Espectros de diseño de velocidad calculados con las formas espectrales del CCP95 y el CCP14 modificado

Efecto del suelo

Los depósitos de suelo blando modifican en amplitud y contenido frecuencial el movimiento sísmico, como resultado del tránsito de las ondas sísmicas por los materiales geotécnicos, los cuales exhiben un comportamiento fuertemente no lineal, aumentando los amortiguamientos totales y degradando su módulo de rigidez a medida que son sometidos a mayores deformaciones cortantes. Este comportamiento tiende a modificar radicalmente la forma de los espectros de respuesta a nivel de la superficie del terreno (o a nivel de la cimentación de las estructuras), en comparación con el movimiento en la base del depósito.

Con el fin de ilustrar el efecto del suelo blando en la modificación del movimiento fuerte, se modeló un perfil de suelo seleccionado arbitrariamente. Se trata de un perfil conformado totalmente por materiales aluviales, granulares, de profundidad intermedia (30 metros) y rigidez intermedia ($V_{s30} = 530$ m/s). Este perfil es de tipo C según la clasificación NHERP,

misma usada en el CCP14. Se modeló este perfil mediante un análisis de respuesta no lineal, transitando un acelerograma de roca firme desde la base del depósito, para obtener una respuesta de movimiento fuerte en superficie. Los espectros de respuesta del acelerograma resultante y el incidente fueron calculados con el fin de encontrar la relación de amplificación de aceleraciones espectrales ($S_{a_{sup}} / S_{a_{roca}}$), la cual se presenta en la Figura 6.

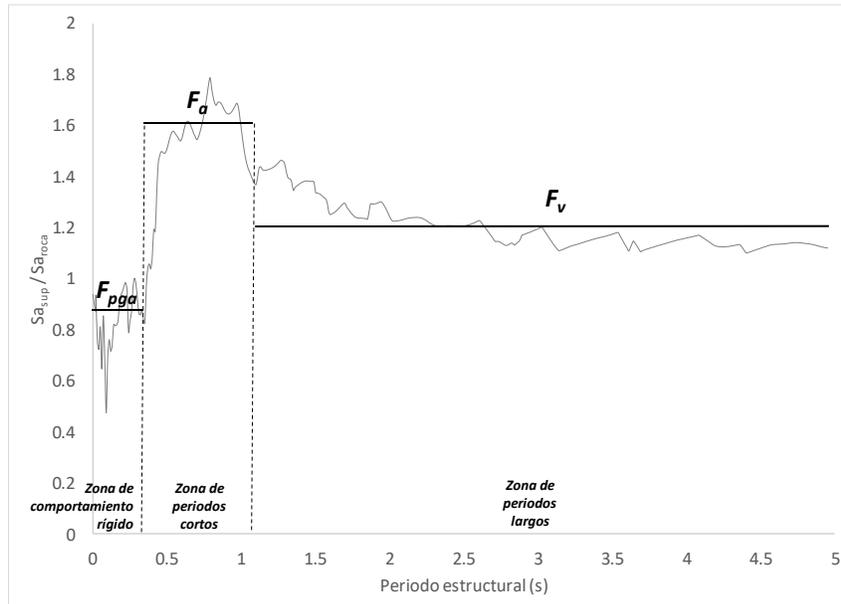


Figura 6. Relación de amplificación ($S_{a_{sup}} / S_{a_{roca}}$) de las aceleraciones espectrales como resultado de la respuesta del perfil de suelo modelado ante un acelerograma seleccionado arbitrariamente

El comportamiento de la relación de amplificación típicamente es el presentado en la Figura 6. Nótese que es posible identificar tres zonas principales: una de periodos muy cortos (o zona de comportamiento rígido), otra de periodo corto y otra de periodo largo, para las cuales es posible establecer valores de amplificación en términos de un único parámetro representativo. Estos parámetros son los mismos que se emplean en la formulación de las formas espectrales del CCP14 (F_{pga} , F_a y F_v). Estos parámetros deben encontrarse de manera específica sitio a sitio, mediante un *estudio de respuesta local*, excepto en casos donde el diseño estructural, por la naturaleza del puente, pueda ser simplificado al máximo.

Nótese también que definir la amplificación del suelo con un único parámetro, como en la formulación del CCP95 (parámetro S), evidentemente induce mayores errores en los valores de movimiento de diseño, siendo esta una simplificación exagerada y difícil de sustentar.

Conclusiones

El análisis presentado permite concluir que las formas espectrales incluidas en el CCP95 son incoherentes con la física de los terremotos y de la respuesta de osciladores de un grado de libertad (espectros de respuesta). En 1995, cuando es publicado este documento, no se daba la debida relevancia a los desplazamientos en estructuras, basando casi totalmente los diseños en fuerzas y resistencia de elementos. Recientemente esta concepción ha cambiado, llevando a nuevas formulaciones de espectros de diseño, compatibles no solo

con la complejidad del fenómeno mismo, sino con nuevas disposiciones que dan la debida relevancia a otras medidas del movimiento fuerte más allá de la aceleración.

Si bien la forma espectral incluida en el CCP14 no permite garantizar un control de desplazamientos adecuado (zona de desplazamientos constantes en espectros de respuesta), en general su estructura funcional permite que dicha modificación se aplique sin mayores contratiempos, tal y como se propone en esta nota. La versión modificada del espectro CCP14 es consistente con lo observado en terremotos reales.

El perfil de suelo blando sobre el cual se cimientan las estructuras (de ser este el caso) induce modificaciones para nada despreciables en el movimiento fuerte. Dichas modificaciones tienden a amplificar (aunque no en todos los casos ni en todos los periodos) las aceleraciones espectrales incidentes en el depósito (a nivel de roca firme). La manera más apropiada para involucrar dicha amplificación es mediante la definición de por lo menos tres parámetros asociados al suelo, tal y como se establece en el CCP14. La manera de incorporar estos efectos dispuesta en el CCP95 es, por lo tanto, muy insuficiente.

En conclusión, no es recomendable usar las formas espectrales del CCP95, en ninguna circunstancia ni para ningún tipo de actividad de ingeniería de estructuras. Lo recomendable es emplear, siempre, la versión modificada de las formas espectrales del CCP14. Así mismo, es recomendable siempre ejecutar *estudios de respuesta local*, que permitan encontrar los tres parámetros asociados a la amplificación del suelo, excepto para casos donde sea posible simplificar al máximo el diseño estructural.

Referencias

Bernal G., Cardona, O.D. (2015). *Modelación probabilista de efectos de sitio en ciudades y su aplicación en Bogotá*. Series: Monographs in Earthquake Engineering. Editor: Alex H. Barbat. CIMNE. UPC, Barcelona. ISBN 978-84-945077-6-2.

INVIAS, Ministerio de Transporte, AIS. (1995). Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes – CCP95.

INVIAS, Ministerio de Transporte, AIS. (2014). Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14.



www.ingeniar-risk.com