

de-
arq

DEARQ - Revista de Arquitectura / Journal of
Architecture

ISSN: 2011-3188

dearq@uniandes.edu.co

Universidad de Los Andes
Colombia

Vargas Rubiano, Hernando; Vargas Caicedo, Hernando
El Terraconcreto en Colombia: Apuntes para su historia
DEARQ - Revista de Arquitectura / Journal of Architecture, núm. 1, 2008, pp. 120-128
Universidad de Los Andes
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=341630310014>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

El Terraconcreto en Colombia: Apuntes para su historia

Hernando Vargas Rubiano (1917-)

Arquitecto, presidente SCA (1957, 1955-1956) y presidente honorario, Práctica profesional independiente desde 1941.

Hernando Vargas Caicedo (1948-)

Ingeniero civil, con estudios de maestrías en arquitectura y planeación urbana en MIT. Profesor Asociado de la Universidad de los Andes, Facultad de Arquitectura y Diseño, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Director del Grupo de Investigación Historia de la Técnica Constructiva en Colombia.
hvargas@uniandes.edu.co



Resumen de la Ponencia (Abstract)

This paper considers the first recorded uses of soil-cement in rural house building in Colombia in 1942 after its promotion by Hernando Vargas Rubiano as architect with ICI (Instituto de Crédito Territorial). It studies the following developments in Colombia leading to the birth of the CINVA-RAM during the next decade.

Palabras clave (Key words)

terraconcreto, suelo-cemento, vivienda campesina, Kastner, Vargas Rubiano, CINVA-RAM

"Hay el error al suponer que existe un sólo camino para el desarrollo, que es el camino que han seguido los países que actualmente son desarrollados".

Eladio Dieste en **Panorama de la arquitectura latinoamericana** (1)

"El procedimiento desgraciadamente en vez de haberse ido perfeccionando se ha degenerado, pues las construcciones en tapia que hoy se hacen, no presentan las condiciones de resistencia que tenían las coloniales...y aún no se conocen con precisión las mezclas que los españoles empleaban para conseguir muros resistentes".

Hernando Vargas Rubiano (2)

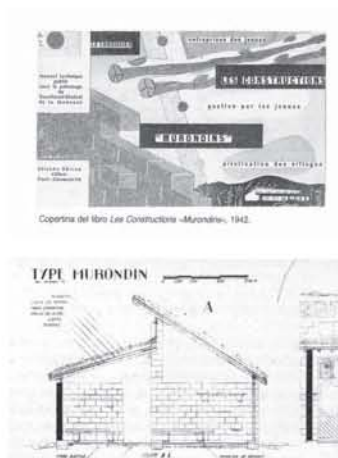
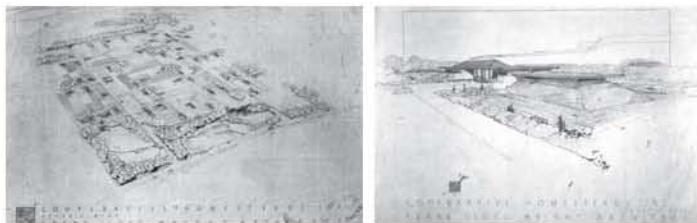
"Un siglo de empleo de la máquina transformó más a la humanidad que los 3000 años precedentes. La máquina no ha sido aún analizada sin prejuicios y los problemas que

trae consigo están sin solución. El objeto de la máquina es liberar energías. Los esfuerzos usados para adquirir las necesidades primordiales se pueden emplear en obtener una existencia intelectual y material más completa"

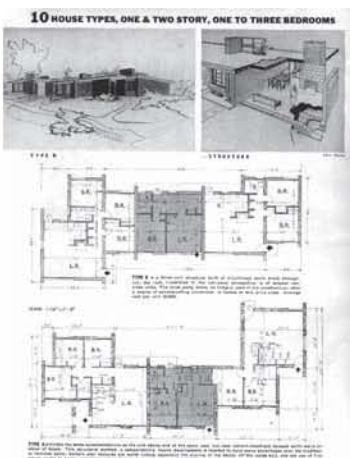
Alvaro Ortega, en **Función Social de la Arquitectura** (3)

Actualmente se está generando a nivel nacional e internacional el interés por recuperar la milenaria construcción en tierra (4). El siguiente artículo propone presentar en forma resumida el proceso de estudio y desarrollo que tuvo en sus primeras dos décadas la técnica del suelo-cemento en Colombia, a partir de la iniciativa que a finales de 1941 tuvo el arquitecto Hernando Vargas Rubiano para su adaptación en viviendas campesinas colombianas del Instituto de Crédito Territorial.

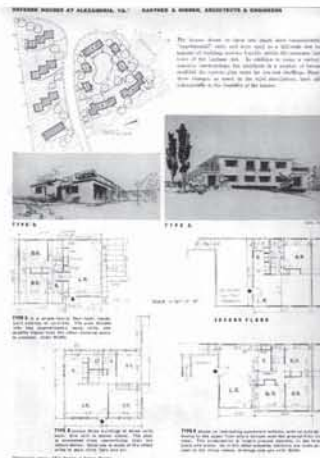
(Fig 1) Casas propuestas por Wright en tapia pisada, 1942



(Fig 2) Casas de refugio en adobe propuestas por LeCorbusier en 1940



(Fig 3) Alternativas en varios sistemas constructivos, incluyendo tapia pisada, propuestos por Kastner en 1941.



El clima de la innovación en la edificación de viviendas en 1941

Se han identificado raíces históricas distantes (5, 6, 7) de la construcción en tierra. Y se han ubicado referentes del siglo XX sobre su renacimiento gradual (4) con ejemplos pioneros en Bélgica (1920), Inglaterra (1920 y 1927), Suecia (1921 y 1923), Noruega (1925), Dinamarca (1929) y en Estados Unidos (1935 y 1940).

Por entonces, diversos intérpretes y profetas de la modernidad declaraban sus ideales. Wright definía (8) “la arquitectura moderna, llamémosla ahora arquitectura orgánica, es una arquitectura natural, la arquitectura de la naturaleza, para la naturaleza”. Se dice que la Gran Depresión de los años 30 había generado en Norteamérica un ánimo por el regreso a la tierra (9). En sus Cooperative Homesteads, proyecto para Detroit (1942) Wright planteó casas en muros de tierra apisonada, con bermas en tierra para la protección ambiental (8). A su turno, Le Corbusier estaba proponiendo en 1940 con el advenimiento de la devastación bélica, casas de refugio rural autoconstruidas en adobe llamadas Les Murondins (10).

El ICT se fundó en 1939 durante la administración del presidente Eduardo Santos, como un organismo público encargado de promover la construcción de habitaciones populares en el país (11). Aunque su énfasis inicial era la vivienda campesina, para 1942 se había creado una sección de vivienda urbana. Su primer gerente, José Vicente Garcés Navas (1939-1947) recibió del arquitecto Hernando Vargas Rubiano, entonces recién graduado en la primera promoción de arquitectos de la Universidad Nacional en Bogotá (Mayo de 1941) y funcionario del Instituto, la solicitud de apoyo para realizar un viaje de estudios a los Estados Unidos e investigar allí los desarrollos que tenía la construcción de casas económicas en suelo-cemento. Vargas Rubiano, nacido en Tunja (Boyacá) tenía una estrecha relación con la tapia pisada, técnica vernácula en su tierra de origen y se interesó en la noticia aparecida en la revista internacional Coronet (1941) sobre los experimentos y logros que el arquitecto Alfred Kastner estaba presentando en modelos de casas con suelo cemento en el área de Washington (12).

Vargas Rubiano había construido como niño sus primeras casas para las palomas usando los comunes adobes de la tradición neogranadina (13). Formaba parte de un grupo de profesionales de distintas disciplinas, recién egresados de la Universidad Nacional, en viaje de estudio con el patrocinio de la Unión Panamericana (antecesora de la posterior OEA) a diversas universidades del este de los Estados Unidos. Garcés Navas manifestó su interés en el tema investigativo planteado por Vargas Rubiano y autorizó el viaje del joven arquitecto.

Kastner

Desde la Universidad de Pennsylvania, Vargas Rubiano contactó a Kastner para conocer de cerca su técnica. Debe advertirse que los constructores, ingenieros, arquitectos, industriales, funcionarios públicos en Estados Unidos, estaban por entonces interesados en el desarrollo de múltiples tecnologías constructivas para la vivienda. Este inédito esfuerzo, documentado ampliamente en revistas de la profesión como *Architectural Record* y *Architectural Forum*, señalaba múltiples proyectos, concursos y prototipos, entre otros, que surgían de la labor convergente de los actores mencionados alrededor del problema sentido de oferta de viviendas de calidad a menores costos. Kastner y Bien habían desarrollado en Cameron Valley, cerca de Alexandria, Virginia, un conjunto de viviendas económicas en suelocemento que era ya reconocido.

Los Estados Unidos habían heredado, el ímpetu que países europeos, y en especial de Alemania. Esta búsqueda demostró simultáneamente el descubrimiento de procesos tecnológicos nuevos en materiales industriales y la reinterpretación de técnicas históricas para adecuarlas a formas de producción contemporáneas.

La estructuración de grandes planes como los del TVA por Roosevelt y la acción de las asociaciones de planificadores regionales había contribuido a situar en el interés público el tema de la planeación urbana y la construcción de viviendas. Adicionalmente, la actividad europea en nuevos desarrollos tecnológicos marcó un grupo dinámico de referentes para nuevas propuestas en Norteamérica sobre las tecnologías constructivas, principalmente para viviendas individuales durante los años 30. Un activo representante de ese conjunto de inventores-promotores fue Alfred Kastner, de origen europeo, quien desarrolló diversas soluciones técnicas en los Estados Unidos desde finales de la década.

Alfred Kastner (1900-1975) había llegado a los Estados Unidos en 1924 desde Alemania, trabajado en firmas de arquitectos norteamericanas y ganado concursos nacionales, como el de la Lehigh Portland Cement Competition en 1928, e internacionales, como el teatro total para Kharkov en 1930. En 1936 la Division of Subsistence Homesteads le había encargado el diseño de una comunidad cooperativa para confectionistas inmigrantes de Europa Oriental con 200 casas y servicios comunitarios integrales. Kastner & Storonov (1932-1937) habían realizado las reconocidas Carl Mackley Houses (1933-34), conjunto de bloques de apartamentos cerca de Philadelphia. Se ha dicho (16) que este proyecto era, de los 43 casos construidos de la PWA (Public Works Administration) el más avanzado en ideas arquitectónicas y programáticas. Se trataba de un conjunto de vivienda con sistemas completos de apoyo comunitario, algunos de ellos operados por medios cooperativos. Documentos de este período forman parte de las colecciones Kastner en la Universidad de Rutgers. Sus diseños posteriores con Kahn para las casas de Jersey Homestead (1936) utilizando bloques de escoria, representan una de las más tempranas aplicaciones de la línea Bauhaus en Norteamérica. (17).

Llegada del suelo cemento a Colombia

A pesar de que el suelo-cemento había sido propuesto, y aplicado crecientemente con éxito en grandes planes de pavimentación en esos años del New Deal, Kastner actuaba como un pionero en la aplicación del suelo cemento para levantar muros de casas. Sus prototipos en construcción, que visitara Vargas Rubiano en el invierno de 1941 en Endicott, utilizaban moldes de madera trepadores, asegurados con pasadores transversales, para vaciar en sitio mezclas controladas de suelo y cemento que se apisonaban entre tapiales metálicos por medio de pisones neumáticos, con mezclas hechas a mano.

Para entonces, Víctor Schmid (14) había iniciado, en 1940, su práctica de construcción en tapia pisada en el área de la Sabana de Bogotá. De regreso a Colombia, Vargas Rubiano emprendió la adaptación del sistema a las casas campesinas que tenía a su cargo en diseño y construcción en el área de Bogotá.

Para entonces, y como se declaró agitadamente en el Primer Congreso Nacional de Arquitectos reunido en Bogotá (1942) (18), la crisis provocada por el estallido de la segunda Guerra Mundial limitaba drásticamente

la importación de materiales y hacía reflexionar sobre el valor de utilizar, prioritariamente, elementos locales, dentro de las cuales el terraconcreto se reconocía como técnica destacada. Era indispensable una entidad “que trabaje y mantenga íntima vinculación con sus similares en todas las Américas para un intercambio de experiencia e investigaciones que redundarán en provecho de las clases pobres”. Y un “aprovechamiento máximo de los materiales locales y aún de la arquitectura regional que en ocasiones consulta las necesidades locales y cuyos sistemas constructivos merecen estudio para su perfeccionamiento”. Debía crearse “una escuela rotativa y permanente de obreros en donde éstos puedan adquirir una enseñanza práctica y teórica para el perfeccionamiento de la albañilería”. Se solicitaba al gobierno nacional crear “un instituto de estandarización de materiales nacionales de construcción”. Con la ayuda de otros técnicos del ICT como el ingeniero Pedro Thomas, y con pruebas en sitio y algunos ensayos en el laboratorio de materiales de la Universidad Nacional sobre granulometría y resistencias mecánicas, emprendió Vargas Rubiano la construcción de una serie de casas en terraconcreto desde el primer semestre de 1942.

Entonces, se aplicaban dos términos diferenciadores (2) para las aplicaciones del suelo cemento: soil-cement para la aplicación en vías o pisos en general y terracrete para los muros de edificaciones. Vargas se quejaba del desconocimiento sobre las mezclas que los españoles empleaban para conseguir mayores resistencias: sangre, cloruro de sodio, cal, con adiciones de paja o pelo de animales. Repasaba algunos de los episodios norteamericanos recientes como el de casas en tapia pisada en Maryland por McDonall, los estudios en Carolina del Sur sobre suelocemento en vías por desde 1933, las pruebas de Patty en South Dakota State College y los experimentos de la Portland Cement Association. De hecho (20) en las memorias que Vargas Rubiano consiguió en Enero de 1942 en Washington sobre la 38ª. Convención Anual de la American Road Builders Association (Enero 1941), se había movilizado un trabajo creciente para la estabilización de suelos en el sistema de autopistas norteamericano. Se registraba que el cloruro de calcio se había empezado a utilizar desde 1933 consiguiendo cerca de 8000 millas estabilizadas mediante este producto. También se usaban cloruro de sodio, ligantes de lignina, el producto designado como Raylig y otros químicos especiales. Como segundo sistema de estabilización se destacaba la bituminosa, desarrollada

a partir 1935, mediante asfaltos, breas y emulsiones, acumulando cerca de 4000 millas de vías en 1939. Por último, la estabilización de vías en suelocemento estaba surgiendo con cerca de 250 millas acumuladas en 1939, en su mayoría construidas entre 1938 y 1939. Se destacaba que desde 1935 la Portland Cement Association había acometido la experimentación del caso. A principio de los cuarenta (21) se empezaba a conocer el tema por los ingenieros colombianos, en medio de una época en la que predominaban los pavimentos asfálticos y, en menor grado, los recientes pavimentos en concreto (7).

Aparte de Patty, citado por Vargas Rubiano en 1943, basado en South Dakota (22, 23), Kastner era un promotor destacado de la aplicación del suelo cemento a la edificación en vivienda, y pionero en su ejecución cerca de Washington, en proyectos con apoyo gubernamental. Se han citado diversos antecedentes en Norteamérica, como las obras de los Ellington (1923), los trabajos del South Dakota State College (1933), las publicaciones del Farmers Bulletin (1934), donde la tierra apisonada empezaba a revalorarse y divulgarse con mejoras en sus técnicas de uso, esencialmente orientada a construcciones rurales.

Vargas Rubiano (2) explicaba el origen y desarrollo de la técnica para las casas en terraconcreto. Milenaria e inmemorial, la tapia pisada se usaba en innumerables casos en la Colombia de entonces.

En el costo de la casa campesina el rubro principal eran los fletes de elementos producidos a gran distancia de los sitios rurales donde se adelantaban las soluciones individuales. Vargas Rubiano había adaptado de la tipología común de casas rurales norteamericanas la silueta de un tejado que permitía alojar en la planta alta el área del dormitorio familiar para reducir la planta total construida. Los habitantes tenían, con el terraconcreto o suelocemento, una técnica familiar a su cercana tapia pisada, ahora mejorada en la escogencia de las clases de arcilla arenosa y la proporción de cemento. La primera casa experimental en suelo cemento se levantó en Sibaté en 1942, con muros de 25 centímetros de espesor y una proporción de 1 a 10 en cemento y tierra areno arcillosa, como vivienda del vigilante del asilo de dementes. Otras casas se adelantaron en sitios como Funza, Facatativá y Tausa y Pacho, en proyectos individuales del ICT. A finales del año, se había publicado esa experiencia y se reclamaba como pionera en América Latina,

en publicaciones como las de la revista Estampa. Para el año siguiente y para atender el problema de la destrucción por inundación del corregimiento de El Playón en el municipio de Rionegro (Santander), en la vecindad de Bucaramanga, el ICT encargó a Vargas Rubiano la realización de un plan completo de decenas de viviendas en suelo cemento, como técnica llamativa por su agilidad, economía y condiciones de servicio. El conjunto se denominó Ciudadela Alfonso López Pumarejo.

Vargas Rubiano acudía a las referencias norteamericanas para ejemplificar las propiedades técnicas principales del suelo cemento, se exaltaban sus condiciones mecánicas, aislamiento térmico y sonoro, impermeabilidad, resistencia a la erosión, incombustibilidad y bajo costo. El argumento de la reducción de fletes se comprobaba en casos específicos de casas campesinas para el ICT donde se habían conseguido precios de \$12 (pesos colombianos) por metro cuadrado de área construida. Se había acumulado una experiencia con distintos tipos de suelos que requerían adiciones de arena, como en Pacho, o que presentaban problemas de acidez. Se citaba la economía relativa del terraconcreto respecto de las construcciones en ladrillo y se recomendaban ensayos de mezclas con diferentes proporciones de cementos y diferentes composiciones de suelo.

A finales de 1943, y después de la práctica de los tapias en suelocemento, Vargas Rubiano no dudaba en re-

comendar un cambio en la orientación. En tanto que los bloques comprimidos a mano con “un pisón de los que se usan comúnmente”, con resistencias de 14 kilogramos por centímetro cuadrado, los “bloques comprimidos por una máquina especial de las usadas para producirlos en serie, mediante una prensa hidráulica, han dado una resistencia hasta de 140 kilos por centímetro cuadrado”. Para la tapia pisada en suelo cemento “se requieren ciertas condiciones especiales que no en todas partes se pueden encontrar. En donde se acostumbra a trabajar el sistema de la tapia pisada es muy fácil la aplicación de este sistema, por el adiestramiento de los obreros en el apisonamiento, manejo de las formaleas o tapias y plomos y niveles de éstas. Pero en donde se ha olvidado completamente este sistema y el obrero trabaja solamente el ladrillo o el adobe es muy difícil la adaptación al sistema de la tapia”.

Extendida la experiencia a un mayor número de situaciones, La Cartilla de Construcciones Rurales (25) describía varias opciones de vivienda campesina y métodos alternativos para su construcción en varios contextos climáticos. El programa de vivienda campesina acumulaba 14000 casas construidas en el país entre 1939 y 1957 cuando el ICT cedió a la Caja Agraria su administración (11). En América Latina se extendía el conocimiento del tema: los brasileños (1949) (26), y los argentinos (27), que publicaron trabajos sobre casas de tierra apisonada y de suelocemento.

Ecos y desarrollos posteriores

A partir de su fundación en 1951 (28), el CINVA llevó a cabo, con el liderato del arquitecto Leonard Currie, pupilo de Gropius en Harvard, una extraordinaria tarea de formación y experimentación en temas constructivos. El énfasis se había desplazado, con la industrialización y urbanización, a los centros urbanos mayores y el ICT se destacaba en sus proyectos experimentales y búsquedas en laboratorio en la búsqueda de aplicaciones, entre otros puntos, para adobes con arcilla o escoria. Cuando Vargas Rubiano asiste, como presidente y representante de la SCA durante 1955 y 1956, al Comité Consultivo del CINVA, sucediendo a Rafael Obregón, insiste en el desarrollo por este centro de técnicas que continúen las experiencias iniciales del terraconcreto, limitado en

su difusión y calidad por las exigencias del encofrado y apisonado. Había que superar las máquinas de catálogo para bloques conocidas en 1943, con motor, bomba, grupo de compresión y múltiples dispositivos para carga y pesaje, por una serie nueva, esencial, movida por energía humana. A su turno, el hijo del primer gerente del ICT Vicente Garcés Navas, arquitecto César Garcés Vernaza, colaborador de Currie y su sucesor en 1956 y 1957, colaboraría en diversas formas en los nuevos desarrollos del suelocemento con el equipo técnico y estudiantes del Centro.

Las Naciones Unidas, entre otras instituciones estaban divulgando los avances (29). Ya en 1952, en el entonces

protectorado de Uganda (30) se usaba el Landcrete, con bloques de suelo cemento en proporciones de 1 a 15, de los que 8 obreros apisonaban 300 unidades al día. El laboratorio del Town and Country Planning Board de Accra, de la especie del CINVA, ensayaba las tierras estabilizadas. En la Costa de Oro se conocía el Swishcrete como forma de cemento estabilizado (31) y la misma Portland Cement Association continuaba su serie de divulgación sobre este material (19). Enteiche relata que en esta época se tenían máquinas como la *Landcrete*, *Winget* y *Ellson*, y que se hacía pruebas y prototipos en Chile con trabajos de Ayarza, Maturana y Arriagada en 1954 y 1955 en las Universidades Católica y de Chile (32).

Dentro del ambiente de ágil comunicación internacional de redes de centros tecnológicos, en el CINVA se daban trabajos como los de Eyheralde sobre la tierra estabilizada (33), González sobre estabilización con asfalto (34), Solís sobre aplicación del suelocemento a viviendas (35). Eyheralde, dentro de la campaña que emprendiera el Ministerio de Educación Nacional para promover el uso del suelo cemento con el apoyo de los profesores rurales (36) mencionaba avances en curso que permitirían alcanzar producciones de hasta 5000 unidades por día, apropiadas para proyectos mayores.

En su trabajo sobre Sogamoso y Paz de Río, el equipo del CINVA, coordinado por Garcés Vernaza, y el profesor de materiales ingeniero Raul Ramírez Ramírez, reportaba en 1956 (37) que en el entorno de los pueblos boyacenses, según el censo de 1951, se comprobaba el dominio (90 a 95%) del adobe en muros y, en las casas rurales, una coexistencia de la paja (59%) y la teja de barro (40%). Se empleaba entonces una máquina Ellson para conseguir 55 bloques por hora con tres hombres haciendo bloques comprimidos de unos 42 kg./cm² de fatiga a la compresión, usando cales de la región (a un quinto del precio del cemento) y cementos, con tierras rojas de Nobsa que se ensayaban en tamices, para absorción y erosión.

Se ensayaron entonces mezclas 1 a 20 en cemento-tierra y de 1 a 10 en cal-tierra. Es así como el ingeniero chileno Raúl Ramírez Ramírez, profesor del postgrado, desarrolla la virtuosa CINVA RAM, publicada en 1957, y patentada en 1958 (38) síntesis práctica de conceptos vernáculos y medios prácticos y manuales para el mejoramiento de la vivienda por los habitantes con materia-

les del lugar. Ramírez actuó como profesor especialista entre 1953 y 1958 y era experto en diseños estructurales y construcción (39)

La CINVA-RAM pretendía “proporcionar una herramienta útil y económica a aquellas familias que construyen sus viviendas con el esfuerzo de su propio trabajo y, por ende, a los programas de vivienda basados en el sistema llamado de esfuerzo propio y ayuda mutua” (40). La compresión manual de tierra “dentro de pequeños moldes para hacer bloques o dentro de grandes encofrados para formar muros monolíticos, está siendo superada por equipos mecánicos que parecen ser la respuesta a la necesidad planteada. No obstante la gran eficacia de estos equipos, su costo elevado, volumen y peso que dificultan su transporte y a veces, la complejidad de su mecanismo, los ponen fuera del alcance de quienes pueden hacer el mejor uso de ellos”. Con 65 kg de peso por máquina, manejada por dos hombres para hacer 300 bloques diarios, con una mezcla de 1 a 14 cemento a tierra en volumen, la nueva máquina, en lenguaje sencillo y mecánica básica, representaba un hito en la adaptación metódica.

Con la CINVA RAM, se construía la primera casa en la sede del mismo CINVA, inaugurada el 20 de agosto de 1957 y casas en Chambimbal (Buga), Caicedonia, Tabio, La Calera y Saucio. En su Cartilla de la Vivienda (41) se prescribía el suelo-cemento, fabricado en moldes manuales para pocas unidades entre otras fórmulas, para la divulgación de la vivienda.

Alrededor del mundo, la CINVA RAM hizo carrera y se transformó en múltiples caminos, desarrollo de una fabricación ligera en unidades de fácil manejo para el uso de la tierra estabilizada como material competente y competitivo. En el manual sobre asismicidad en vivienda económica (42) desarrollado en la Universidad Católica de Chile se reconocía al suelocemento como material para una construcción más segura: “las cualidades resistentes de los ladrillos de suelo-cemento, fabricados en forma adecuada, son excelentes”. Se empezaba a dar un amplio proceso de diseminación internacional a partir de la eficacia de la pequeña máquina.

Se ha descrito en forma muy genérica el ámbito de difusión internacional (43): a través del intercambio entre centros de investigación tecnológica y con el apoyo de organismos como CARE, UNICEF, VITA, Cuerpos de Paz,

Fu sagasugá,
Cundinamarca, 1941



Tabio,
Cundinamarca, 1943



Fu sagasugá,
Cundinamarca, 1942



Vivero de Leiva,
Boyacá, 1943



(Fig 5) Casas Campesinas del ICT 1941-1943



(Fig 8) El primer manual de la CINVA - RAM en 1957

la máquina habría alcanzado localidades como Ghana, Indonesia, Bangladesh (entre 1968 y 1974), Perú (1980) y México. En el caso de uno de los autores, fue una sorpresa encontrar en Corea del Sur, en 1983, referencia a la máquina del CINVA, entonces imitada y transformada en máquinas que utilizaban aditivos de origen orgánico para construcción económica de bloques así como a la firma Metalibec, promotora de su comercialización internacional con contactos en Australia.

La arquitectura rural en Colombia, desconocida y descuidada (44), presentaba a finales de los setenta un cuadro de diversidad tecnológica que convocaba a una tarea investigativa y promocional de proporciones mayores. Haciendo referencia al Ecodesarrollo, Álvaro Ortega

(45, 3) proponía los bloques estabilizados con azufre, como alternativa al cemento, y trazaba una geografía colombiana para su futura utilización. Y en su resumen de experiencias y proyectos en décadas de servicio, investigación y docencia, nos recordaba: “el uso de la tierra permite la autoconstrucción con que las poblaciones locales se proveen de vivienda. La tierra es un material gratis que se encuentra en diferentes regiones de todos los países. Es un recurso renovable y su uso no implica gasto de energía”.

Sin duda, y a pesar de las amnesias, se había recuperado un gran cauce: “Y así, unos países siguen trabajando la tierra, que nunca abandonaron, y otros están retomándola por reconocerle calidades apropiadas” (46).

Notas bibliográficas

- (1) Bayón, Damián y Gasparini, Paolo (eds)
Panorama de la arquitectura latinoamericana. Blume, UNESCO, 1977
- (2) Vargas Calcedo, Hernando
Casas en Terraconcreto, en Ingeniería y Arquitectura, Vol V, Noviembre y Diciembre de 1943, Nos. 53 y 54
- (3) Carbonell, Galaor
Alvaro Ortega: Proarquitectura del bienestar. Escala, Somosur, Facultad de Arquitectura, Universidad de los Andes, 1989
- (4) CRATerre: Doat, P et al
Construir con tierra, Tomo 1. ENDA, Fedevivienda, 1990
- (5) Giedion, Sigfried
La arquitectura como fenómeno de transición: Las tres edades del espacio en arquitectura. G.Gili, 1969
- (6) Vargas Calcedo, Hernando
DE LA TAPIA PISADA A LA PIEDRA LÍQUIDA: Elementos para la historia del concreto y su desarrollo en Colombia. Capítulo en impresión dentro del libro (título provisional) *Expresión del concreto en Colombia*, editado por Asocreto previsto para Octubre de 2006.
- (7) Vargas Calcedo, Hernando
Building Forms in a Colonization Frontier. Monografía no publicada en el curso GSD 3308 Indigenous Architecture, Profesor Albert Szabo, Graduate School of Design, Harvard University, Diciembre 1985
- (8) Wright, Frank Lloyd
An Organic Architecture. Conferencia ante RIBA, 1939, en Frank Lloyd Wright Collected Writings, Vol 3 1931-1939. Rizzoli, 1993
- (9) Frampton, Kenneth
Modernization and Mediation: Frank Lloyd Wright and the Impact of Technology, en Riley, Terence (ed). Frank Lloyd Wright, Architect. The Museum of Modern Art, 1994
- (10) Winter, John
Le Corbusier's Technological Dilemma, en Walden, Russell (ed) The Open Hand: Essays on Le Corbusier. MIT Press, 1982
- (11) Saldarriaga, Alberto et al
ICT: Medio siglo de vivienda social en Colombia, 1939-1989 INURBE, 1995
- (12) **Defonso Houses at Alexandria, VA** Kastner & Bion, Architects and Engineers. Low-Cost Housing. Architectural Forum, October 1941
- (13) Téllez, Germán
Crítica e Imagen. Escala, 1998
- (14) Sánchez, Clara Eugenia y Angel, Clara
Construir con tierra en Colombia, en Guibert, Jean Jacques (ed) Tecnologías urbanas socialmente apropiadas: experiencias colombianas. ENDA, 1987
- (15) Vivoni, Enrique
Hacia una modernidad tropical: la obra de Henry Klumb, 1928-1984. En Periferia. Internet Resources for Architecture and Urban Design in the Caribbean. Visitado en Septiembre 7 de 2006
- (16) Handlin, David P
American Architecture. Thames and Hudson, 1985.
- (17) Ford, James y Katherine M. Ford
Design of Modern Interiors. Architectural Book Publishing, 1942
- (18) Gnecco Fallon, José (ed)
Sociedad Colombiana de Arquitectos. **Primer Congreso Nacional de Arquitectura.** Bogotá 22 a 28 de Noviembre de 1942. Cooperativa Nacional de Artes Gráficas, Abril de 1943
- (19) Portland Cement Association
Soil-Cement Construction Handbook. PCA, 1956
- (20) Burggraf, Fred
Stabilization's Place in our Present Day Highway System, ponencia en Proceedings Thirty-Eight Annual Convention American Road Builders' Association. ARBA, Enero 1941
- (21) Ojeda, A.E
Estabilidad de suelos con emulsiones asfálticas, en Anales de Ingeniería, V48,N549, Junio 1940
- (22) Patty, Ralph
Age Strength Relationship for Rammed Earth. En Engineering News Record, V117, N2, p44, 1936
- (23) Patty, Ralph L. y Minium, L.W
Rammed Earth Walls for Farm Buildings. South Dakota State College, 1945
- (24) Molina, Luis Fernando
La tierra como material de construcción: el caso de la tapia Trabajo premiado en el Concurso Materiales de Construcción, Carrera de Construcción, Universidad Nacional, Medellín, 1987 Universidad Nacional, 1989
- (25) Wills Ferro, Alberto y Maldonado, Gustavo
Cartilla de Construcciones Rurales. ICT, 1946
- (26) Associação Brasileira de Cimento Portland
Casas de paredes monolíticas de suelocemento. ABCP, São Paulo, 1949
- (27) Merrill, Anthony F., Moia, José Luis (trad)
Casas de tierra apisonada y suelocemento. Windsor, 1949
- (28) Rivera Paéz, Jorge Alberto
El CINVA: Un modelo de cooperación técnica 1951-1972 Tesis de Maestría en Historia, Universidad nacional, Bogotá, Noviembre 2002
- (29) Crane, Jacob
Houses of Earth. CINVA, s.f
Libro citado en UN Housing and Town and Country Planning, No. 4, Octubre 1950
- (30) Atkinson, G. Anthony
Diseño y construcción en los trópicos. Serie Traducciones, Adaptaciones y Reimpresiones, No. 5. CINVA, 1955
- (31) Swishcroft: **Notes on stabilized cement earth in the Gold Coast.** Colonial Building Notes, No. 17, September 1953
- (32) Enteiche, Augusto
Suelo-cemento: su aplicación en la edificación. CINVA, 1963
- (33) Eyheralde, René
Proyecto tierra estabilizada. CINVA, mecanografiado, 1954
- (34) González, Luis
Informe sobre investigaciones especiales: tierra estabilizada con asfalto. CINVA, 1955
- (35) Solís, Hugo
Aplicación del suelo-cemento en la construcción de viviendas CINVA, 1957
- (36) Eyheralde, René
Proyecto tierra estabilizada. Conferencia en Seminario de Orientación Rural y Asuntos Sociales del Ministerio de Educación Nacional. CINVA, 1955

(37) CINVA

Proyecto Sogamoso-Paz de Río: Ensayo de una metodología
Serie Trabajos de Clase No 1, 1956

(38) Mayor, Alberto

Inventos y patentes en Colombia 1930-2000: De los límites de las herramientas a las fronteras del conocimiento. ITM, 2005

(39) CINVA

Nota necrológica Raúl Ramírez Ramírez. Boletín Informativo, Abril 1971

(40) Floren, Luis (editor) CINVA

CINVA RAM: Máquina portátil para hacer bloques de tierra estabilizada. CINVA, 1957

(41) Departamento de Estudios y Proyectos del Banco Central Hipotecario Urbano y de Obras Públicas de México, Sánchez, Félix (ed). **Cartilla de la vivienda.** CINVA, 1956

(42) Amenábar, Juan (coord). **Asismicidad en viviendas económicas.** CINVA, Unión Panamericana, 1959

(43) Sandoval, José B

Sistemas estructurales de suelo-cemento para uso habitacional y posibilidades en Costa Rica, en Memorias Seminario Internacional de Construcción en Tierra en Areas Sísmicas. Pontificia Universidad Católica del Perú, Mayo 1983

(44) Saldarriaga, Alberto y Fonseca, Lorenzo. **La arquitectura de la vivienda rural en Colombia.** Conciencias, CENAC, 1980

(45) Ortega, Alvaro. **Alternativas Técnicas a la Crisis Ambiental en Colombia.** Conciencias-BCH-Fonade, Agosto 1977

(46) Gutiérrez, Ramón y Viñuales, Graciela María. **Los materiales,** en sección Grandes Voces de Arquitectura Latinoamericana en el Siglo XX, Cecodal, 1998.

Otras referencias:

(1) Clough Williams-Ellis y John y Elizabeth Gastwick-Field
Publicación citada sin título exacto en inglés sobre “**Construcciones de tapial, pisé y tierra estabilizada**”. Country Life, London, 1919. Ellington, Kart e Inez

(2) **Modern Pisé Building: Home Buildings with Compressed Rammed Earth – A Revelation for the Farmer and Settler**
Folleto 105 pp, 1923

(3) **Rammed Earth Walls for Buildings**
Bulletin No 1500, 26 pp, 1926.

(4) **Rammed Earth Walls for Farm Buildings**
Bulletin 277, South Dakota State College, 67 pp, 1933

(5) **Adobe & Sundried Bricks for Farm Buildings.** Farmers Bulletin No. 1721, USDA, 18 pp, 1934. Betts, MC y Miller, T.A.N

(6) **Rammed Earth for Buildings**
Washington DC, 1937. Publicación citada sin impresor

(7) Hansen, E
The Suitability of Stabilized Soil for Building Construction
Bulletin 17, Vol XXXIX, U. of Illinois, 1941

(8) Vargas Rubiano, Hernando. **La Vivienda Campesina,** en Ingeniería y Arquitectura, Vol IV, No. 41, Octubre 1942

(9) **El TIAM del ICT.** PROA 30, Noviembre de 1949. PROA 284

(10) **The Properties of Compacted Soil and Soil Cement Mixtures for Use in Building**
NBRI, Series DR2, South Africa Council for Scientific and Industrial Research, 1950

(11) Maldonado, Gustavo
Estabilidad y compactación de los suelos y las mezclas asfálticas. Ingeniería y Arquitectura, Vol 109 - 110, Enero y Abril de 1953

(12) Eyheralde, René

La tierra estabilizada como material de construcción. CINVA, 1955

(13) Ellson Equipment

Building in Stabilized Soils. Westgate, Johannesburg, 1956

(14) Cerda, Enrique

Casa campesina de suelo cemento. CINVA, 1957

(15) Garcés Vernaza, César

Informe de la misión para realizar un anillo de demostración de la máquina CINVA RAM. CINVA, 1958

(16) IBEC Housing Corporation

Stabilized-Soil and the CINVA-RAM Block Press. IBEC, 1959

(17) Guerrero, Angelina

Apuntes sobre suelo-cemento, en Anales de Ingeniería, V74, N751, Julio y Agosto 1965

(18) Enteiche, Augusto

Aplicación del suelo estabilizado a la construcción de viviendas, en Anales de Ingeniería, V84, N 789, Enero y Marzo 1976

(19) Angel, Clara y Sánchez, Eugenia

Arquitectura de tierra: una aproximación historiográfica a su desarrollo, en ESCALA 145, 1989

(20) Vargas, Hernando

Cambio Técnico en la Edificación en Colombia en el Siglo XX, SCA, 2000

(21) Angulo, Darío

La arquitectura de tierra

Catálogo de programa del curso en el departamento de Arquitectura, Universidad de los Andes, Charlas 5, Noviembre de 2002

(22) Girard, Jean Luc

Une presse pour la construction en terre crue avec blocs de terre comprimée. www.passerelleecoo.info, visitada Septiembre 7 de 2006

Créditos fotográficos

(Fig. 1) Frampton, Kenneth. **Modernization and Mediation: Frank Lloyd Wright and the Impact of Technology,** en Riley, Terence (ed). Frank Lloyd Wright, Architect. The Museum of Modern Art, 1994 (pag. 58)

(Fig. 2) Winter, John. **Le Corbusier's Technological Dilemma,** en Walden, Russell (ed). The Open Hand: Essays on Le Corbusier. MIT Press, 1982 (pag. 322)

(Fig. 3) **Defense Houses at Alexandria,** VA Kastner & Bien, Architects and Engineers. Low-Cost Housing. Architectural Forum, October 1941 (pag. 98)

(Fig. 4) Gnecco Fallon, José (ed)
Sociedad Colombiana de Arquitectos (pag. 25). **Primer Congreso Nacional de Arquitectura,** Bogotá 22 a 28 de Noviembre de 1942
Cooperativa Nacional de Artes Gráficas, Abril de 1943

(Fig. 5) Vargas Rubiano, Hernando. **Casas en Terraconcreto,** en Ingeniería y Arquitectura, Vol V, Noviembre y Diciembre de 1943, Nos. 53 y 54

(Fig. 6) Burggraf, Fred. **Stabilizations's Place in our Present Day Highway System,** ponencia en Proceedings Thirty-Eight Annual Convention American Road Builders' Association. ARBA, Enero 1941 (pag. 151)

(Fig. 7) Saldarriaga, Alberto et al. **ICT: Medio siglo de vivienda social en Colombia,** 1939-1989. INURBE, 1995 (pag. 59)

(Fig. 8) Floren, Luis (editor) CINVA. **CINVA RAM: Máquina portátil para hacer bloques de tierra estabilizada.** CINVA, 1957 (pag. 3)

Comportamiento dinámico de puentes en arco con amortiguadores viscosos

Nicolás Parra García

Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá 1996. Especialista en Diseño y Construcción de Puentes, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 1998. Posgrado en Dinámica Estructural, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2002. Consultor independiente en Ingeniería Estructural. Profesor Instructor, Departamento de Arquitectura, Universidad de los Andes, Bogotá.

José de Jesús Álvarez Sereno

Profesor. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Angel C. Aparicio Bengoechea

Catedrático. Universidad Politécnica de Cataluña

Resumen

En éste trabajo se presenta la respuesta sísmica analítica de dos puentes en arco de gran luz, sometidos a un movimiento simulado que incluye efectos de fuente cercana. Para reducir la respuesta se exploró su comportamiento conectando los dos extremos del tablero con la subestructura por medio de amortiguadores viscosos. Se llevaron a cabo una serie de análisis en el plano de ambos modelos para identificar los amortiguadores óptimos. Los resultados indicaron que el uso de amortiguadores viscosos con comportamiento no lineal, ofrece una solución práctica para reducir la respuesta dinámica de estas estructuras.

Abstract

This paper presents the analytical seismic response of two long-span arch bridges, under a simulated ground motion including near-field terms. To reduce the response, its behavior was studied connecting both ends of the deck to the substructure through viscous dampers. A series of 2D analysis was carried out for both models with the aim of identifying the optimum dampers. The results showed that the use of viscous dampers with nonlinear behavior offers a practical solution for reducing the dynamic response of this structures.

Palabras Clave:

Puentes en arco, amortiguadores viscosos, disipadores de energía, respuesta dinámica, acelerograma sintético, comportamiento no lineal.

Antecedentes

Con la ocurrencia de los sismos de Loma Prieta (1989), Northridge (1994), Kobe (1995) y Taiwan (1999), quedó en evidencia la alta vulnerabilidad de las estructuras de puentes y viaductos y el alto costo económico que supone, no sólo su reparación, sino también la interrupción de las vías que comunican. A partir de ésta experiencia,

se evidenció la necesidad de profundizar en el estudio de la respuesta sísmica de las estructuras y de mejorarla por medio de la inclusión de dispositivos capaces de moderar o incluso anular el efecto del sismo en ellas, desarrollando la tecnología de los disipadores de energía aplicada a grandes construcciones.

La construcción de puentes en arco ha resurgido a nivel mundial gracias al método de avance en voladizo, y éstos representan ya uno de los tres tipos de puentes de gran luz junto con los puentes atirantados y los colgantes; sin embargo, hasta ahora son escasas las investigaciones acerca de la respuesta sísmica de puentes en arco equipados con dispositivos disipadores de energía. Aún cuando estas estructuras no han sufrido daños importantes en el pasado, resulta interesante estudiar cómo puede mejorarse su comportamiento ante movimientos sísmicos severos, mediante la introducción de dispositivos de control pasivo como lo son los amortiguadores viscosos.

Amortiguadores de fluidos viscosos

El amortiguamiento es el proceso mediante el cual los sistemas estructurales disipan y absorben la energía inducida por excitaciones externas. Entre otros efectos, el amortiguamiento reduce la amplitud en la respuesta del sistema y controla el aumento en la energía de deformación.

Un amortiguador viscoso es un dispositivo que disipa energía por medio de la aplicación de una fuerza resistente a lo largo de un desplazamiento finito. La reacción en el amortiguador actúa en dirección opuesta a la del movimiento de entrada, y como su funcionamiento se rige por las leyes de la mecánica de fluidos, el valor de la fuerza resistente varía de acuerdo con la velocidad translacional del amortiguador en cualquier instante de tiempo.

La energía disipada por el amortiguador es igual al trabajo realizado por la fuerza en el dispositivo a lo largo de su desplazamiento:

$$E_d = \int F du \quad (1)$$

Donde F es la función que caracteriza la fuerza en el amortiguador, y u es el desplazamiento. El medio de disipación de energía es la transferencia de calor; por ejemplo, la energía mecánica disipada por el amortiguador causa un calentamiento del fluido, y esta energía de calor es transferida al medio por mecanismos de transporte como la convección y la conducción.

Este trabajo presenta la respuesta sísmica analítica de dos puentes en arco de gran luz dotados de amortiguadores viscosos con diferentes propiedades y sometidos a un movimiento simulado que incluye efectos de fuente cercana. De ésta manera se pueda evaluó la eficiencia de los amortiguadores a la hora de atenuar la respuesta sísmica de la estructura y se plantean algunas consideraciones de análisis y diseño a tener en cuenta para futuras investigaciones.

La ecuación constitutiva que rige el comportamiento de estos amortiguadores se define de la siguiente manera:

$$F = C \cdot V^n \quad (2)$$

donde F es la fuerza de amortiguamiento, V es la velocidad a través del dispositivo, C es el coeficiente de amortiguamiento, y n es un exponente que define el tipo de amortiguador. Si el exponente es igual a la unidad, el dispositivo proporciona amortiguamiento lineal; otros valores de n producen el funcionamiento no lineal del aparato, tal como lo muestra la figura 1.

La fuerza generada por el amortiguador es debida a la presión diferencial a través de la cabeza del pistón. Al pasar de un lado a otro del compartimiento, el volumen del fluido se reduce como consecuencia del recorrido del pistón y del área de su cabeza. Como el fluido es compresible, dicha reducción en volumen está acompañada de una fuerza restauradora que se desarrolla. En general, éstos dispositivos añaden amortiguamiento viscoso al modo fundamental de la estructura, y aumentan el amortiguamiento y la rigidez en los modos altos, lo cual suprime su contribución en la vibración (Taylor y Constantinou, 1996).

Los amortiguadores viscosos, entre otras ventajas relativas a su funcionamiento, reducen los desplazamientos máximos esperados ante excitaciones dinámicas, absorben la fuerza sísmica y por tanto liberan de esfuerzos a los aparatos de apoyo del puente, y contribuyen a

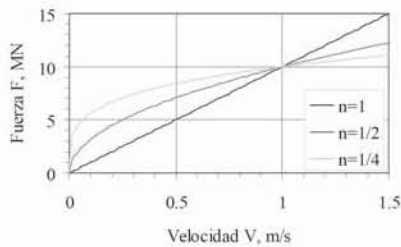


Figura 1. Diagrama Fuerza - Velocidad para un amortiguador con coeficiente $C= 10 \text{ MN/(s/m)^n}$.

controlar la amplificación dinámica al disminuir el pico de resonancia de la estructura y le permiten recuperar su posición inicial después del sismo, lo cual no puede lograrse utilizando otro tipo de disipadores. Otra ventaja

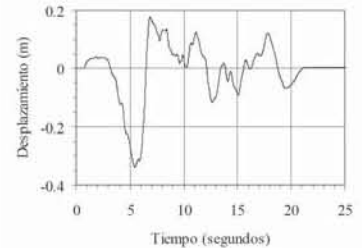
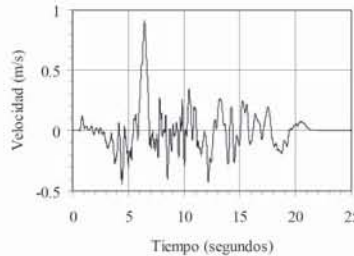
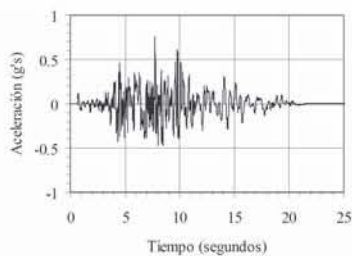
consiste en que, al ser dependiente de la velocidad, la fuerza introducida por un amortiguador viscoso es prácticamente nula para movimientos de baja velocidad, como la expansión térmica en puentes.

Movimiento sísmico utilizado para el estudio

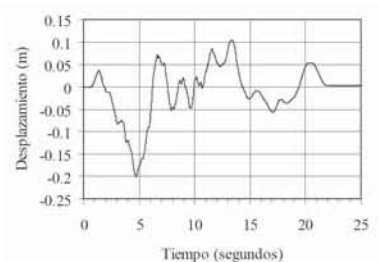
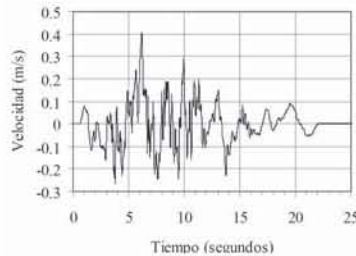
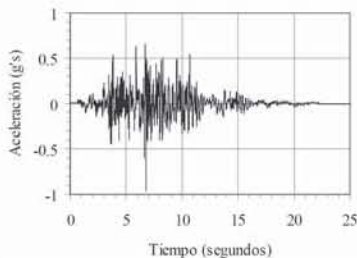
Para esta investigación se utilizó como movimiento de entrada el sismo simulado que se generó para el estudio del puente Bixby Creek en la costa de California (McCallen *et al.*, 1999); dicha estructura se localiza aproximadamente a 1 km. de la falla de Palo Colorado – San Gregorio, a la que se le atribuye una magnitud máxima esperada de 7.5 y aceleraciones pico de hasta 0.96g.

Figura 2. Historias temporales incluyendo efectos de fuente cercana (McCallen *et al.*, 1999)

Se generaron tres acelerogramas sintéticos (normal a la falla, paralelo a la falla y vertical), que incluyeron las componentes de movimiento del terreno de fuente cercana, que pueden dar lugar a pulsos de desplazamiento de periodo largo. En la figura 2 se presentan las historias temporales de aceleración, velocidad y desplazamiento, para las componentes Normal a la falla y Vertical, que fueron empleadas en este análisis en las direcciones longitudinal y vertical respectivamente.



a). Normal a la falla



b). Vertical

Geometría

La figura 3 muestra una vista en elevación del modelo GL, dimensionado específicamente para esta investigación. Se trata de un puente en arco con tablero superior de 20 m de ancho (cuatro carriles), con una longitud total de 600 m y un arco con una luz principal de 400 m y flecha de 80 m, para una relación flecha/luz de 1/5. La luz y la flecha propuestas para el arco son muy similares a las del actual récord mundial, el Puente Wanxian, en China, que tiene una luz de 420 m. El modelo está compuesto por 10 vanos parciales sobre el arco de 40 m cada uno, cuatro vanos de 35 m (dos a cada lado del arco), y dos vanos de 30 m (uno en cada extremo). En la figura 4 se presentan las secciones transversales de la estructura. El arco posee una sección en cajón de altura variable, disminuyendo linealmente desde 7 m en los arranques hasta 5.5 m a 60 m de ellos medidos en dirección longitudinal, y altura constante de 5.5 m en el resto.

Todas las pilas desplantadas sobre el arco se consideraron continuas con éste. Las dos pilas principales (P3 y P13) se consideraron continuas con la superestructura. Las pilas adyacentes a cada lado de las principales (P2, P4, P12 y P14) se supusieron articuladas en su conexión con la superestructura; se decidió sujetarlas en su extremo superior dada su esbeltez. El resto de las pilas, incluyendo la conexión clave del arco – superestructura (P1, P5 a P11, y P15) y ambos estribos, se consideraron equipados en su extremo superior con aparatos de apoyo *pot* que permiten el deslizamiento longitudinal de la superestructura sobre la subestructura. Finalmente, se supuso que todas las pilas discontinuas y ambos estribos estarían dotados de llaves de cortante que tomaran los desplazamientos transversales de la superestructura. Como consecuencia, despreciando la fricción en los aparatos *pot*, las pilas P2, P3, P4, P12, P13 y P14 en dirección longitudinal, y todas las pilas, el arco y ambos estribos en direcciones transversal y vertical resistirían las fuerzas de inercia de la superestructura.

Modelo de análisis para el puente

Las pilas, el arco y el tablero se modelaron mediante elementos barra tridimensionales. Los momentos de inercia y las áreas de cortante de las secciones transversales de las pilas, de concreto reforzado, se consideraron iguales al 70% de la sección bruta, con la finalidad de to-

mar en cuenta el agrietamiento distribuido a lo largo de ellas; el área y la constante de torsión se tomaron para la sección bruta. Para el arco se consideraron las propiedades de las secciones completas dado que la elevada fuerza axial de compresión que en él actúa permite despreciar el agrietamiento. Para el tablero, de concreto preesforzado, también se consideraron las propiedades de la sección bruta, dado que el agrietamiento en estos elementos es generalmente despreciable. Se consideró un concreto con resistencia a la compresión de 40 MPa, con módulo de elasticidad de 30,891 MPa, una relación de Poisson de 0.2 y un peso volumétrico de 24.5 kN/m³.

El modelo numérico del puente se realizó con ayuda del programa SAP2000 Nonlinear (CSI, 1997), que permite modelar amortiguadores viscoelásticos tipo Maxwell (un resorte y un amortiguador viscoso conectados en serie) a través de los elementos tipo *Nllink*. El modelo analítico del puente se presenta en la Figura 5. En las pilas de más de 20 m de altura se consideraron nudos intermedios con separaciones de entre 10 y 15 m, dado que los modos altos podrían contribuir significativamente a su respuesta dinámica. Para el arco, además de la conexión con las pilas, se consideraron tres nudos intermedios, y para el tablero un nudo intermedio para captar la respuesta en diversos puntos de éstos. Se tomó en cuenta el efecto de nudo rígido en los extremos de las barras mediante la herramienta *end offset*; así mismo, mediante *member releases* se liberaron los grados de libertad de los extremos de las barras congruentes con el modelo descrito anteriormente. También se consideró la variación de las propiedades a lo largo de las seis barras adyacentes a los arranques del arco, ya que se propuso un arco de peralte linealmente variable, mayor en los arranques. En cuanto a las condiciones de apoyo se refiere, las pilas (P1, P2, P3, P13, P14 y P15) y los arranques del arco se consideraron empotrados; se decidió hacer así dado que este tipo de estructuras generalmente se desplantan sobre suelo muy firme o roca, y porque se quería estudiar de manera aislada la respuesta del puente.

Se realizó sobre el modelo un análisis Dinámico No Lineal o *Time History*, para obtener información detallada de la respuesta temporal de la estructura. Los acelerogramas sintéticos correspondientes a las componentes

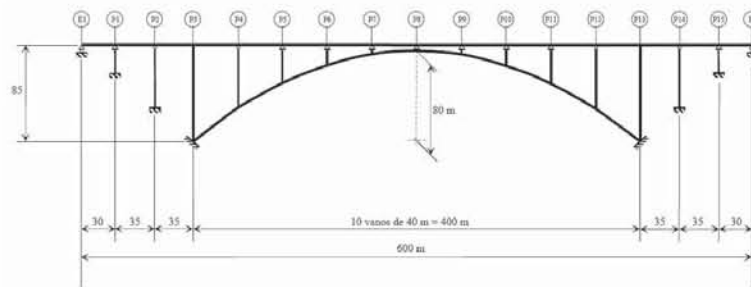


Figura 3. Vista en elevación del modelo GL.

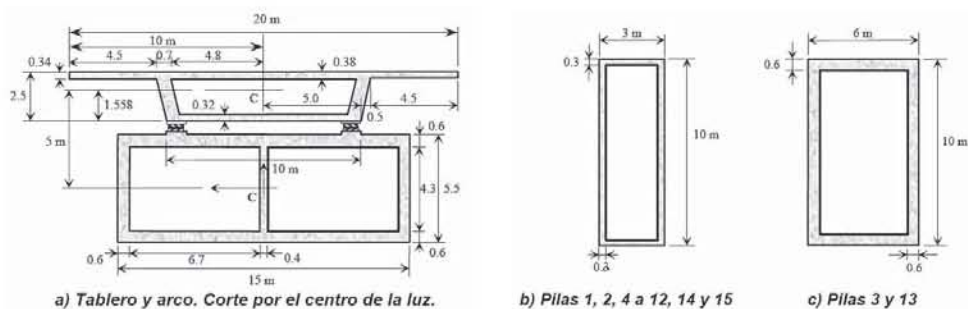


Figura 4. Secciones transversales del modelo GL.

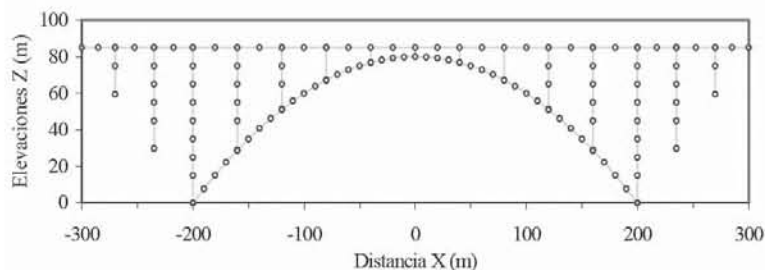


Figura 5. Modelo analítico del puente GL.

normal y vertical del movimiento descrito anteriormente fueron introducidos al modelo como parejas de valores de tiempo y fracción de aceleración de la gravedad, y se creó un caso de carga sísmica en el cual ambas señales actúan simultáneamente sobre el modelo.

Propiedades dinámicas del modelo

En la tabla 1 se presentan los periodos naturales y los porcentajes de participación de masa acumulada para

los primeros 10 modos de vibrar de la estructura. Se observa que la masa efectiva acumulada no es suficiente para evaluar adecuadamente la respuesta del modelo, por lo que en los diferentes análisis se consideraron los primeros 75 modos, con lo que la masa efectiva acumulada rebasaba ya el 99% en todos los casos. En la figura 7 se presentan las configuraciones modales para los primeros tres modos de vibrar.

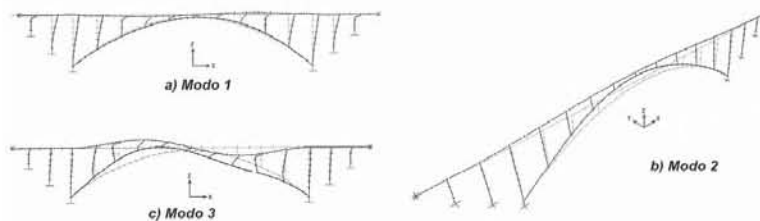


Figura 6. Configuraciones modales del modelo GL

Modo	Periodo (s)	Masa efectiva (%) acumulada		
		Longitudinal	Transversal	Vertical
1	4.340	56.3069	0.0000	0.0000
2	4.288	56.3069	62.5550	0.0000
3	3.161	57.6128	62.5550	0.0000
4	1.790	57.6128	62.5550	0.0000
5	1.690	57.6128	62.5550	0.0001
6	1.227	57.6128	75.8083	0.0001
7	0.967	59.7666	75.8083	0.0003
8	0.904	59.7666	75.8083	0.0003
9	0.808	59.7666	75.8083	43.1109
10	0.637	59.7666	75.8083	61.1145

Tabla 1. Periodos naturales y masa efectiva acumulada para el modelo GL

MODELO	C. kN(s/m)^n	n
GL básico	Sin amortiguadores	
GLnl-1-0.25	1000	¼
GLnl-1-0.5		½
GLnl-1-1.0		1
GLnl-3-0.25	3000	¼
GLnl-3-0.5		½
GLnl-3-1.0		1
GLnl-6-0.25	6000	¼
GLnl-6-0.5		½
GLnl-6-1.0		1
GLnl-10-0.25	10000	¼
GLnl-10-0.5		½
GLnl-10-1.0		1
GLnl-30-0.25	30000	¼
GLnl-30-0.5		½
GLnl-30-1.0		1
GLnl-60-0.25	60000	¼
GLnl-60-0.5		½
GLnl-60-1.0		1
GLnl-100-0.25	100000	¼
GLnl-100-0.5		½
GLnl-100-1.0		1

Tabla 2. Características de los amortiguadores para el modelo GL

Comportamiento con amortiguadores viscosos

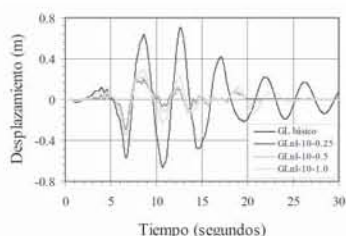
Se evaluó la respuesta sísmica del modelo GL en el plano del puente, sometiéndolo a los acelerogramas que incluyen efectos de fuente cercana. El objetivo del estudio paramétrico fue evaluar el comportamiento del modelo sin dispositivos disipadores de energía y empleando amortiguadores de fluidos viscosos regidos por la ecuación constitutiva definida anteriormente.

Para los modelos con amortiguadores se colocó uno en cada extremo del tablero, conectando la superestructura con los estribos, los que se supusieron completamente fijos. Con la finalidad de obtener los amortiguadores óptimos se consideraron valores del exponente n de ¼, ½ y 1. Para cada uno de estos exponentes se consideraron varios valores del coeficiente C . En la tabla 2 se pre-

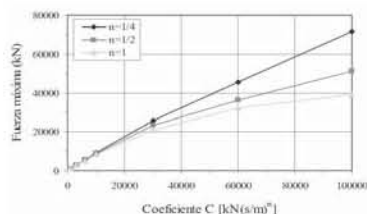
sentan los diferentes casos analizados. El software empleado permite modelar amortiguadores viscoelásticos mediante el modelo de **Maxwell**. Para que los elementos **Nlink** se comporten como amortiguadores viscosos es necesario asignar al resorte conectado en serie un valor suficientemente grande (no demasiado, ya que se pueden presentar problemas de inestabilidad numérica); para este caso se le asignó al resorte una rigidez igual a diez veces la rigidez axial del tramo de tablero que conectaba con el estribo, es decir, 1.349×10^8 kN/m. Para

todos los casos se supuso un amortiguamiento viscoso de la estructura igual al 5%.

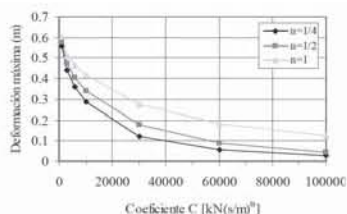
Se analizaron un total de 22 casos. La respuesta del puente se monitoreó en función del tiempo en varios puntos de interés. Uno de los más significativos fue el desplazamiento longitudinal de la superestructura. En la figura 7.a) se presenta la historia temporal de desplazamientos para los modelos GL básico y con $C=10,000$ kN(s/m)ⁿ. El desplazamiento máximo longitudinal que



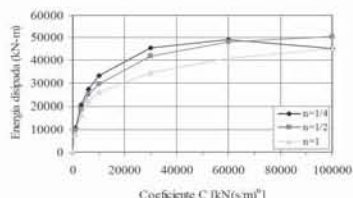
a) Desplazamiento longitudinal del tablero



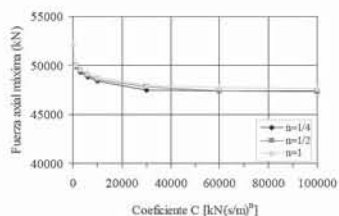
b) Fuerza máxima en los amortiguadores



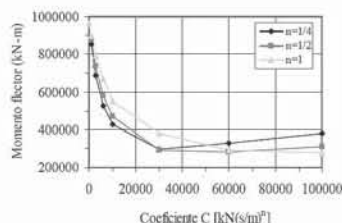
c) Deformación máxima en los amortiguadores



d) Energía disipada por los amortiguadores



e) Fuerzas internas máximas por sismo en la base de las pilas 3 y 13



f) Fuerzas internas máximas por sismo en los arranques del arco

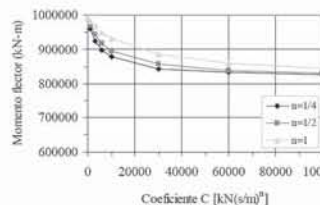
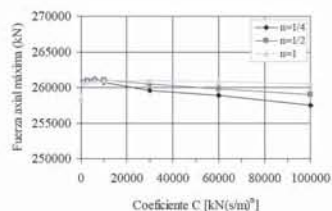


Figura 7. Respuesta sísmica del modelo GL ante un evento sísmico de fuente cercana

alcanzó el modelo sin amortiguadores fue de 0.70 m para 12.64 s. En la misma figura se observa la reducción de la respuesta al colocar los amortiguadores; los más eficientes para este caso resultaron los que tienen un exponente $n=1/4$, que redujeron el desplazamiento máximo a tan sólo 0.29 m para un tiempo de 6.62 s.

La figura 7.b) muestra la fuerza máxima que se generó en cada amortiguador en función del parámetro C . Cada punto de esta gráfica proviene de los resultados de un análisis dinámico usando una pareja de valores de C y n . La tendencia fue suficientemente clara, pues resultaron mejores los amortiguadores con $n=1/4$, ya que para un mismo valor de C pudieron desarrollar una fuerza mayor disminuyendo así la respuesta de la estructura.

La figura 7.c) muestra la deformación máxima en los amortiguadores, que a su vez es el desplazamiento longitudinal del tablero, en función del coeficiente C . Nuevamente, los amortiguadores con el valor más pequeño de n acusan un mejor desempeño, ya que para una misma C reducen en mayor medida la deformación máxima. Nótese que para $C>30,000 \text{ kN(s/m)}^n$ la tasa de reducción en la deformación disminuyó. Además, en la figura 8.d) se presenta la energía disipada acumulada en los amortiguadores en función del parámetro C . Una vez más, resultaron más eficientes los amortiguadores

con $n=1/4$, salvo para los valores mayores de C ; también para $C>30,000 \text{ kN(s/m)}^n$ el incremento en la energía disipada disminuyó notablemente, inclusive se presentó un decremento para el modelo GLn1-100-0.25.

Las fuerzas internas máximas en la base de las pilas 3 y 13, originadas por el evento en cuestión, se presentan en la figura 7.e). Se aprecia que la fuerza axial por sismo prácticamente no disminuyó, apenas una tendencia del 10% en el mejor de los casos. Por el contrario, el momento flexionante máximo debido a sismo tuvo un descenso notable, alcanzándose una tendencia a un mínimo para $C=30,000 \text{ kN(s/m)}^n$. El aporte de los amortiguadores en el decremento de los desplazamientos longitudinales del tablero se ve reflejado en la disminución del momento flexionante en las pilas principales, ya que éstas se supusieron continuas con la superestructura, y por lo tanto muy sensibles a cualquier movimiento en su extremo superior.

Para la configuración estructural seleccionada, el arco se vio menos favorecido. En la figura 7.f) se presentan sus respuestas máximas. La fuerza axial máxima debida a sismo prácticamente no varió al incorporar los amortiguadores, y el momento flexionante apenas tuvo una tendencia a disminuir, del orden del 15%.

Segundo modelo: puente VG

Geometría

El segundo modelo que se dimensionó con motivo de esta investigación fue el modelo VG. La figura 8 muestra una vista en elevación del modelo. Se trata de un puente en arco con tablero superior de 15 m de ancho, con una longitud total de 242 m y un arco con una luz de 162 m y flecha de 27.49 m, para una relación flecha/luz de 1/5.89.

Este modelo está compuesto por 9 vanos parciales sobre el arco de 18 m cada uno, dos vanos de 18 m (uno a cada lado del arco), un vano de 11 m en el extremo izquierdo y uno más de 15 m en el extremo derecho. En la figura 9 se presentan las secciones transversales de la estructura. El arco es de sección en cajón bicelular; con altura va-

riable linealmente entre 3.75 m y 2.50 m en una longitud de 27.00 m medida desde cada uno de los arranques del arco; en el tramo interior la sección permanece constante. Para tomar la compresión por momento flexionante negativo, al tablero se le adicionó una losa inferior en la zona sobre pilas (2.25 m a cada lado del eje de las pilas). La vinculación subestructura – superestructura (conectividades de las pilas con el tablero) es similar a la considerada para el modelo GL.

Modelo de análisis

Para esta estructura se elaboró un modelo formado por elementos barra bidimensionales. Las propiedades geométricas de las secciones transversales se calcularon de manera similar al modelo GL. Para este caso se

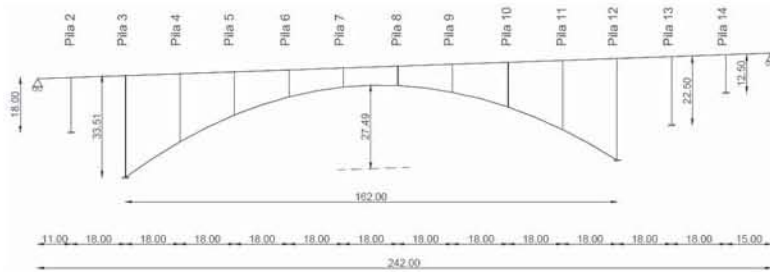


Figura 8. Vista en elevación del modelo VG

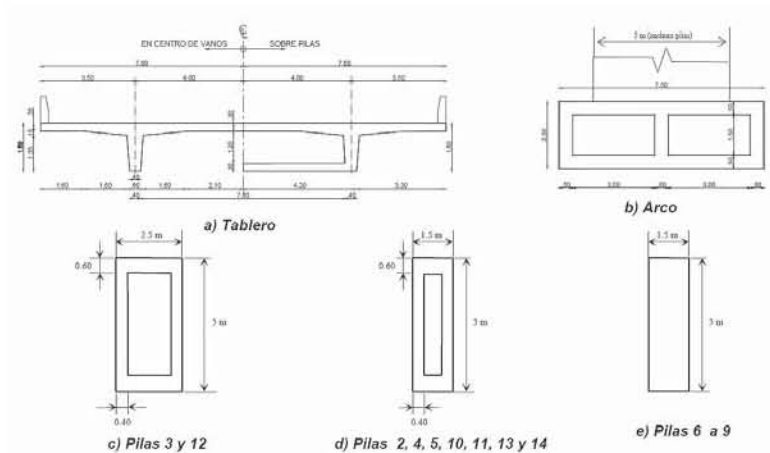


Figura 9. Secciones transversales del modelo VG

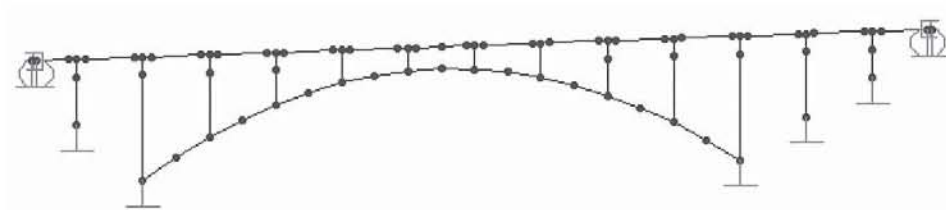


Figura 10. Modelo analítico del puente VG

consideró un concreto con resistencia a la compresión de 35 MPa, con módulo de elasticidad de 24,821 MPa, una relación de Poisson de 0.2 y peso específico de 25 kN/m³. Los arranques del arco y las pilas 2, 13 y 14 se supusieron empotradas en el terreno. Para el modelo numérico se empleó el mismo software que para el caso anterior. El modelo analítico del puente se presenta en la figura 10.

Propiedades dinámicas

En la tabla 3 se presentan los periodos naturales y los porcentajes de masa efectiva de los modos de vibrar más significativos en el plano de la estructura. En los diferentes análisis se consideraron los primeros 60 modos, con lo que la masa efectiva acumulada rebasaba ya el 98% en cada dirección de análisis. En la figura 12 se presentan las configuraciones modales para los primeros dos modos de vibrar.

MODO	Periodo (s)	% de Masa	Sentido
1	1.660	54.56	Horizontal
2	1.415	6.05	Horizontal
7	0.436	47.95	Vertical
9	0.309	14.81	Vertical
21	0.122	21.71	Horizontal
34	0.074	6.75	Vertical

Tabla 3 Periodos naturales y masa efectiva para el modelo VG

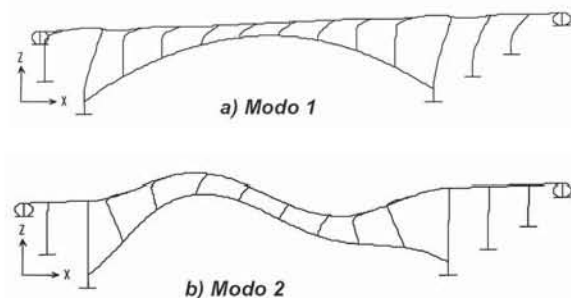


Figura 11. Configuraciones modales del modelo VG

Comportamiento con amortiguadores viscosos

Se evaluó la respuesta sísmica del modelo VG en el plano del puente, sometiéndolo al acelerograma de la figura 2.a) en dirección longitudinal y al de la figura 2.b) simultáneamente en dirección vertical. Al igual que para el modelo GL, se analizó un caso básico sin amortiguadores y 21 casos variando las propiedades de los amortiguadores. En la tabla 4 se presentan los diferentes casos considerados, todos con un amortiguamiento de la estructura del 5%.

La figura 12.a) muestra una historia temporal de desplazamiento longitudinal de la superestructura para los modelos VG básico y con amortiguadores con $C = 6,000 \text{ kN(s/m)}^n$. El modelo sin amortiguadores mostró un desplazamiento longitudinal máximo del tablero de 0.305 m para un tiempo de 8.02 s. Al incorporar los amortiguadores entre tablero y estribos, el modelo comenzó a dismi-

MODELO	C. kN(s/m)^n	n
VG básico	Sin amortiguadores	
VG-1-0.25	1000	1/4
VG-1-0.5		1/2
VG-1-1.0		1
VG-2-0.25	2000	1/4
VG-2-0.5		1/2
VG-2-1.0		1
VG-3-0.25	3000	1/4
VG-3-0.5		1/2
VG-3-1.0		1
VG-4-0.25	4000	1/4
VG-4-0.5		1/2
VG-4-1.0		1
VG-5-0.25	5000	1/4
VG-5-0.5		1/2
VG-5-1.0		1
VG-6-0.25	6000	1/4
VG-6-0.5		1/2
VG-6-1.0		1
VG-10-0.25	10000	1/4
VG-10-0.5		1/2
VG-10-1.0		1

Tabla 4. Propiedades de los amortiguadores para el modelo VG

nir la amplitud de dicho desplazamiento en la medida en que el coeficiente de amortiguamiento del dispositivo era mayor. Se observó, además, que los amortiguadores con exponente n menor resultaban más eficientes y disminuían en mayor proporción los desplazamientos causados por el sismo.

La figura 12.b) muestra la fuerza máxima que se generó en cada amortiguador en función del parámetro C . De manera similar que para el modelo GL, resultaron mejor los amortiguadores con $n = 1/4$, en particular para $C > 5,000 \text{ kN(s/m)}$, ya que para un mismo valor de C pudieron desarrollar una fuerza mayor, disminuyendo así la respuesta de la estructura.

La figura 12.c) muestra la deformación máxima en los amortiguadores, que a su vez es el desplazamiento longitudinal del tablero, en función del coeficiente C . Nue-

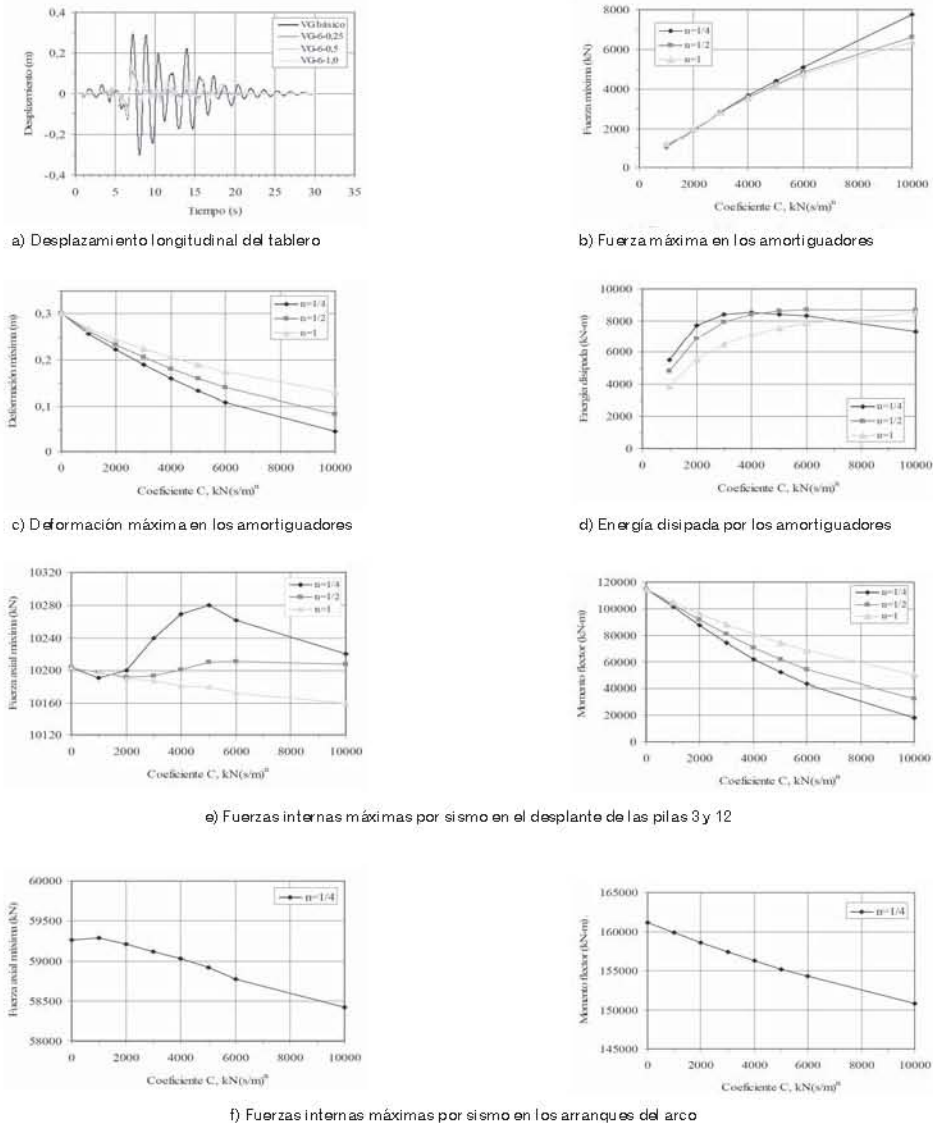


Figura 12. Respuesta sísmica del modelo VG ante un evento de fuente cercana.

vamente, los amortiguadores con el valor más pequeño de n mostraron un mejor desempeño, ya que para una misma C redujeron en mayor medida la deformación máxima. Para $C > 5,000 \text{ kN(s/m)}^n$ la tasa de reducción en la deformación disminuyó ligeramente. En la figura 12.d) se presenta la energía disipada acumulada en los amortiguadores en función de C .

Una vez más, resultaron más eficientes los amortiguadores con $n=1/4$, salvo para los valores mayores de C ; también para $C > 5,000 \text{ kN(s/m)}^n$ el incremento en la

energía disipada disminuyó notablemente, inclusive se presentó un decremento para los modelos con $n=1/4$.

Las fuerzas internas máximas en la base de las pilas 3 y 12, originadas por el evento en cuestión, se presentan en la figura 12.e). Se aprecia que la fuerza axial por sismo prácticamente no varió. Por el contrario, el momento flexionante máximo debido a sismo tuvo un descenso notable, desde 114,643 kN-m para el modelo sin amortiguadores, hasta 17,781 kN-m para el modelo VG-10-0.25 ($C=10,000 \text{ kN(s/m)}^{1/4}$), lo que representa un 15% del

valor inicial. Para la configuración estructural en estudio, el arco se vio menos favorecido. En la figura 12.f) se presentan sus respuestas máximas para $n=1/4$. La fuerza axial máxima debida a sismo prácticamente no varió al incorporar los amortiguadores, y el momento flector apenas tuvo una tendencia a disminuir, del orden del 7% en el mejor de los casos.

Se realizaron dos modelos adicionales con el objetivo de estudiar si podía obtenerse alguna reducción en los esfuerzos causados por sismo en el arco al mejorar la conexión entre éste y el tablero del puente. La única modificación introducida consistió en hacer monolítica la unión entre el tablero y las pilas centrales (7 y 8 en la figura 8), para crear un caso de unión rígida incorporando un arriostramiento en cruz; y un segundo caso en el que se incorporan dos amortiguadores con $C=6000 \text{ kN(s/m)n}$ y $n=1/4$ adicionales a los existentes en cada extremo (Figura 13).

Los resultados obtenidos, aparte del esperado decremento en el período fundamental del puente y portanto de su rigidización, no introdujeron una mejoría notable en los esfuerzos a compresión y flexión en el arco debidos al sismo. La tabla 5 compara los resultados para los tres modelos. (ver tabla 5)

Puede observarse como incluso el hecho de rigidizar la unión en la parte central produce un incremento en el axial y el flector a que se ve sometido el arco, pues al estar unidos rígidamente se absorben mayores esfuerzos sobre todo cuando una de las partes trata de desplazarse ante una excitación. Incluso esta configuración introduciría esfuerzos adicionales por acción de la temperatura.

El puente con amortiguadores adicionales sobre la clave del arco disminuye un poco el esfuerzo axial sobre éste, pero no sucede lo mismo con el momento flector que nuevamente aumenta a causa de la conexión rígida entre tablero y arco en el centro de la luz.

Otro aspecto chequeado fue el desplazamiento horizontal de la clave del arco y su historia temporal al utilizar los amortiguadores. Para los modelos analizados se observa cómo, al conservar las condiciones de apoyo iniciales planteadas para el modelo, la clave se desplaza independientemente de la cantidad o tipo de amortiguador que se utilice en el tablero, y que además, la inclusión de éstos no produce ningún efecto en el movimiento de la clave.

En general, puede explicarse la escasa influencia de los amortiguadores en la respuesta del arco ya que este elemento, como parte principal de la estructura del puente, recibe directamente en sus apoyos los efectos producidos por el movimiento del terreno, transmitiéndolos al resto de la estructura dentro de la cual la respuesta del tablero es la más significativa. Igualmente es importante resaltar que las condiciones de unión entre superestructura y arco son importantes pues varían el comportamiento global, ya que un cambio en las condiciones de apoyo puede aumentar o disminuir la rigidez general del puente. Aunque la continuidad entre tablero y arco disminuyen la flexibilidad y aumentan la redundancia estructural, deben estudiarse los incrementos en esfuerzos de axial y momento en zonas localizadas, así como la mayor influencia de las cargas por acciones térmicas y los efectos reológicos en puentes de concreto reforzado.

Conclusiones

Ante la evidencia innegable de la alta vulnerabilidad de las estructuras viales, demostrada en los últimos grandes sismos de la década de los 90, una de las opciones más interesantes de protección para las estructuras consiste en la incorporación de dispositivos de amortiguamiento que controlen la respuesta dinámica y ayuden a disipar energía. Esta es una opción particularmente atractiva para los puentes en arco, cuyo funcionamiento dominante a compresión axial no permite asegurar su comporta-

miento dúctil durante un sismo, por lo que la inclusión de sistemas que introduzcan amortiguamiento suplementario puede ayudar a mejorar su respuesta dinámica.

Este trabajo presenta los resultados de un estudio paramétrico con amortiguadores viscosos de comportamiento no lineal, con diferentes coeficientes de amortiguamiento para identificar el dispositivo óptimo para los modelos de puente en arco estudiados. Los diversos análisis per-

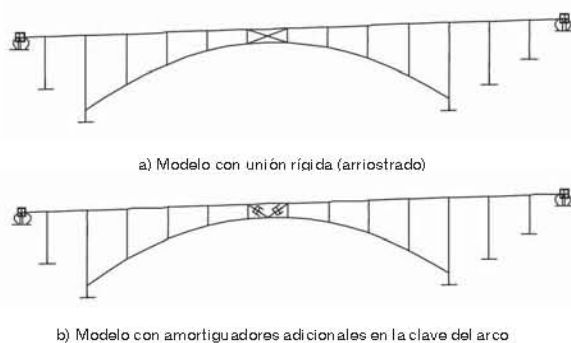


Figura 13. Modelos adicionales de puente con $C=6000 \text{ kN(s/m)}n$ y $n=1/4$.

Tabla 5. Resultados de 3 modelos adicionales, con $C=6000 \text{ kN(s/m)}n$ y $n=1/4$

	Modelo con amortiguadores en los extremos	Con unión rígida entre clave del arco y tablero	Con amortiguadores adicionales en la unión clave tablero
Periodo Fundamental (s)	1.66	1.457	1.42
Desplazamiento Longitudinal máximo (m)	0.109	0.0327	0.0352
Axial Arco (kN)	58770	60330	57440
Momento Arco (kNm)	154287	210500	191900

mitieron identificar los amortiguadores más eficientes para el sismo y los modelos en estudio, que de acuerdo con la evidencia presentada serían amortiguadores con comportamiento no lineal con parámetros $C=30,000 \text{ kN(s/m)}^{1/4}$ para el modelo GL, y $C=5,000 \text{ kN(s/m)}^{1/4}$ para el modelo VG.

La inclusión de los amortiguadores viscosos, además de no introducir esfuerzos adicionales en la estructura, permite disminuir los esfuerzos de flexión en las pilas continuas con el tablero, lo que a su vez conduce a soluciones de cimentación más económicas en puentes de gran luz. De igual manera, la inclusión de los dispositivos permite construir estructuras de tablero continuo, más monolíticas, con la posibilidad de disipar energía y de controlar efectivamente los movimientos por acción de la temperatura y la retracción.

Aunque el aporte de los amortiguadores no fue significativo para disminuir los esfuerzos axiales y de flexión en el arco para la configuración estructural estudiada, es importante resaltar cómo la conexión entre el arco y el tablero influye en el comportamiento general de la estructura. Por éste motivo resulta conveniente estudiar diferentes tipos de vinculación tablero-arco, así como distintas formas de colocación de los amortiguadores para proponer una implementación óptima de éstos dispositivos en puentes de gran claro. Los aspectos prácticos de esta solución, tales como los detalles de conexión e instalación y el mantenimiento de los dispositivos y su vida útil, son temas que quedan por fuera del alcance del presente estudio, y que sirven de punto de partida para desarrollos posteriores de la investigación.

Referencias

Computers and Structures, Inc. (1997), "SAP2000, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures", Version N6.11, Program Documentation.

Dusseau, R. A. and Wen, R. K. (1989), "Seismic Responses of Deck-Type Arch Bridges", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 16, pp. 701-715.

Kawashima, K. and Mizoguti, A. (2000), "Seismic Response of a Reinforced Concrete Arch Bridge", 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper no. 1824, New Zealand, 8 pp.

Kuranishi, S. and Nakajima, A. (1986), "Strength Characteristics of Steel Arch Bridges subjected to Longitudinal Acceleration", Structural Engineering/Earthquake Engineering, Japan Society of Civil Engineers, Vol. 3, No. 2, pp. 287-295.

McCallen, D., Noble, Ch. and Hoehler, M. (1999), **The Seismic Response of Concrete Arch Bridges: With focus on the Bixby Creek Bridge, Carmel, California**, Livermore, California, Lawrence Livermore National Laboratory, 170 pp.

Nazmy, A. S. (1996), "Earthquake-Response Characteristics of Long-Span Arch Bridges", 11th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1309, Acapulco, México, 8 pp.

Seleemah, A.A. and Constantinou, M.C. (1997), "Investigation of Seismic Response of Buildings with Nonlinear Fluid Viscous Dampers", Report No. NCEER-97-0004, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.

Taylor, D. and Constantinou, M.C., (1996), "Fluid Dampers for Applications of Seismic Energy Dissipation and Seismic Isolation", página web www.taylordevices.com/dampers.htm.