

TRIENAL DE INVESTIGACIÓN FAU 2017

V JORNADAS DE INVESTIGACIÓN
DE LA ESCUELA DE ARQUITECTURA
CARLOS RAÚL VILLANUEVA

XXXV JORNADAS DE INVESTIGACIÓN
DEL INSTITUTO DE DESARROLLO
EXPERIMENTAL DE LA CONSTRUCCIÓN

50 ANIVERSARIO
Y JORNADAS DE INVESTIGACIÓN
DEL INSTITUTO DE URBANISMO



MEMORIAS





UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

TRIENAL DE
INVESTIGACIÓN
FAU 2017

V Jornadas de Investigación
de la **Escuela de Arquitectura Carlos Raúl Villanueva**

XXXV Jornadas de Investigación
del **Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción**

50 Aniversario y Jornadas de Investigación
del **Instituto de Urbanismo**



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

Cecilia García Arocha
Rectora

Nicolás Bianco
Vicerrector Académico

Bernardo Méndez
Vicerrector Administrativo

Amalio Belmonte
Secretario

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

Gustavo Izaguirre
Decano

Ariadna Santacruz
Directora de la Escuela Carlos Raúl Villanueva

Geovanni Siem
Director del Instituto para el Desarrollo Experimental
de la Construcción

Yelitza Mendoza
Directora del Instituto de Urbanismo

Idalberto Águila
Coordinador de Estudios de Postgrados

Pedro Franco
Coordinador de Docencia

Hernán Zamora
Coordinador de Investigación

María Victoria Saavedra
Coordinadora de Extensión

Luis Felipe Zamora
Coordinador de Administración

COMITÉ EDITORIAL EDICIONES FAU UCV

Azier Calvo
Coordinador

Michela Baldi
Mayoira Flores
Iván González Viso
Beatriz Hernández
Maya Suárez
Marta Vallmitjana
Desireé Méndez

TRIENAL DE INVESTIGACIÓN FAU 2017

Gustavo Izaguirre
Presidente

Hernán Zamora
Presidente ejecutivo

Comité ejecutivo

Ariadna Santa Cruz
Geovanni Siem
Yelitza Mendoza
Idalberto Águila
Luis Polito
María Victoria Saavedra
Luis Felipe Zamora

Comisiones

Científica

Beatriz Hernández, Rosario Salazar, Benjamín Martín,
Francisco Pérez Gallego

Planificación y gestión

María Elena Hernández, Beverly Hernández, Pavelyn
Márquez

Recursos y servicios informáticos

Atilio Villegas, Félix Velásquez, Ronald Martínez, Larry
Pérez

Publicación

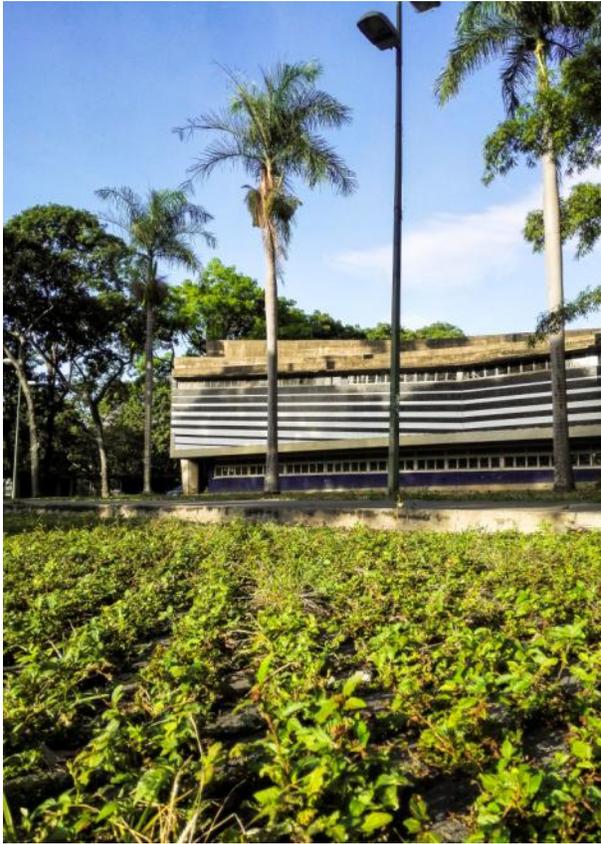
Mayoira Flores

Medios y promoción

Argenis Lugo, Edmundo Ramos, Mario Peñaloza,
Miguel Feijoo

Secretaría

Miriam Oropeza



La Trienal de Investigación FAU 2017 es un evento organizado por la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, de la Universidad Central de Venezuela, por el que se convoca a docentes, investigadores, estudiantes, profesionales y público en general, para intercambiar y reflexionar experiencias de investigación sobre temas de actualidad, vinculados con el pensamiento y la práctica de la arquitectura y el urbanismo.

Esta edición de la Trienal de Investigación FAU 2017 reúne un conjunto de artículos arbitrados de investigadores que respondieron a la convocatoria de tres eventos simultáneos: las V Jornadas de Investigación de la Escuela de Arquitectura Carlos Raúl Villanueva; las XXXV Jornadas de Investigación del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, IDEC y las Jornadas de Investigación del Instituto de Urbanismo, IU.

En homenaje al 50 aniversario del Instituto de Urbanismo y los 450 años de Caracas, la FAU.UCV ofrece en acceso libre y disponible para descarga gratuita este libro **Memorias de la Trienal FAU 2017**.

De esa manera, desde la Ciudad Universitaria de Caracas, declarada Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO, damos testimonio de la perseverancia de la Universidad Central de Venezuela, próxima a cumplir 300 años formando talento para la humanidad.

PRODUCCIÓN EDITORIAL

Coordinador: Hernán Zamora
Producción editorial: Mayoira Flores
Corrección de textos: María Enriqueta Gallegos
Diseño de imagen de la Trienal: Maya Suárez
Diagramación: Hernán Zamora
Programación del formato digital: Mario Peñaloza
Fotografías: Nathalie Naranjo

© Ediciones FAU.UCV, 2017
De las fotografías: © Nathalie Naranjo

Caracas, Venezuela
RIF. G-20000062-7
Depósito legal: DC2017002530
ISBN: 978-980-00-2879-7

EDICIONES DE LA FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

Universidad Central de Venezuela
Av. Carlos Raúl Villanueva
Edf. Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Planta Baja, Los Chaguaramos, Caracas, 1040
Apartado Postal 40362

Teléfonos:
+58 212 6051920 / 6052094
E-mail: ediciones@fau.ucv.ve

Sites:
www.fau.ucv.ve/;
<http://trienal.fau.ucv.ve/>

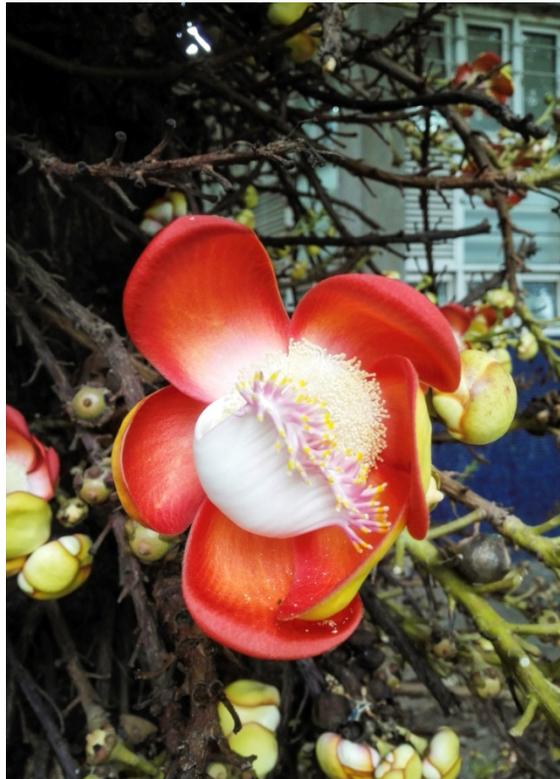


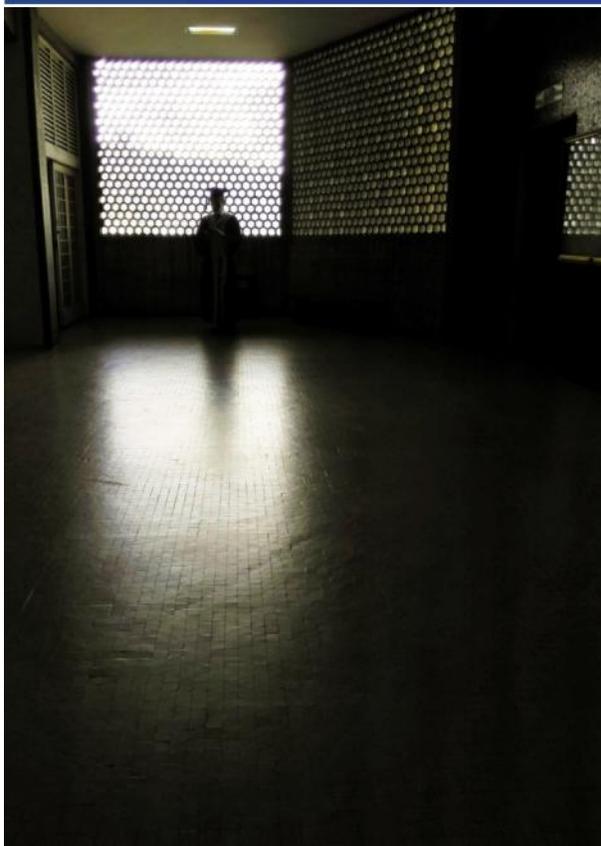
ÁRBITROS

Águila, Idalberto	González, María Zuleny	Pantin, Juan Vicente
Amaya, Florinda	Hernández, María Elena	Parra, Melissa
Anzola, Oscar	Hernández, Beatriz	Peña, María Isabel
Aponte, Edgar	Herrera, Celia	Pérez Gallego, Francisco
Aponte, Freddy	Hippolyte, Pedro Luis	Pérez Le Ray, Valérie
Bencomo, Carolina	Izaguirre, Gustavo	Polito, Luis
Blondet, José Enrique	Jaua, María Fernanda	Pulido, Gabriela
Capra, Fabio	Knudsen, Poul	Rauseo, Newton
Caricatto, Javier	Lamedada, Hernán	Regalado, Ingrid
Cerisola, Javier	Landa, Izaskun	Rodríguez, Claudia
Chacón, José Luis	Linda, Mark	Rosales, Luis
Chávez, Moisés	López Villa, Manuel	Rosas, Iris
Collell, María Eugenia	Lorenzo, Ernesto	Salazar, Rosario
Contreras, Elynayohec	Machado, Carmenofelia	Samsone, Sonia
Coss, Aguedita	Marinilli, Angelo	Sánchez, Isabelle
De Freitas, Julio	Márquez, Pavelyn	Santacruz, Ariadna
De Lisio, Antonio	Martin Frechilla, Juan José	Semeco, Ana
Delgado-Linero, Manuel	Martín, Benjamín	Siem, Geovanni
Escalona, María del Socorro	Martín, Yuraima	Sosa, María Eugenia
Fato, Ana Elisa	Mavarez, Yxenia	Suárez, Javier
Fermín, Ramón	Mendoza, Yelitza	Tineo, Rebeca
Fernández, Marina	Meza, Beatriz	Torres, Hilda
Franco, Pedro	Molina, Pablo	Tovar, Carolina
Galíndez, Jesús	Mujica, Viviana	Velasco, Rebeca
Gómez, José Humberto	Naranjo, Nathalie	Vicente, Henry
González, Alejandra	Olaizola, Carlos	Villalobos, Eugenia
González, Iván	Ontiveros, Teresa	Yépez, Glenda

Este libro, Memorias de la Trienal de Investigación FAU 2017, se ha realizado gracias al apoyo financiero de la **Fundación Fondo Andrés Bello** y de la empresa **Atelier Casa**.

La Facultad de Arquitectura y Urbanismo expresa su agradecimiento a todas las personas que actuaron como árbitros, a los colaboradores en esta edición y, muy especialmente, a todos los investigadores que ofrecieron los productos de su trabajo.





TRIAL FAU 2017: DESENCUENTRO Y PERSEVERANCIA

Durante el año de celebración del 75 Aniversario de la Escuela de Arquitectura Carlos Raúl Villanueva, en 2016, nos planteamos que para esta 4ta edición de la Trienal de Investigación FAU tratáramos algunos aspectos interesantes que tuvieran que ver con las ciudades, los lugares aprendidos entre migraciones y desencuentros, tomando como idea central, justamente, *puentes entre horizontes: «En especial, queremos saber de aquellos horizontes que un día traerán quienes se fueron; los que ven quienes se han separado; los que presienten quienes callan. Queremos conocer los trozos de ciudad que sus ojos aprehendieron; las formas que intuyeron; las estancias donde se intentaron. Queremos ensamblar puentes de palabras para que puedan retornar, unos a otros. Queremos que sepan que desde estas sombras, cada día, nos esmeramos en abrir una nueva ventana, una nueva puerta; porque sabemos que nuestras calles serán otras, mejores, cuando cruzando alguna de ellas, nos volvamos a saludar.»*

Nos motivaba celebrar el 50 aniversario del Instituto de Urbanismo, aprovechar el 450 aniversario de la Fundación de la Ciudad de Santiago de León de Caracas el 25 de Julio, así como tomar en cuenta las consideraciones respecto a la mitigación de riesgo en el proyecto y construcción de edificaciones cumpliéndose 50 años del terremoto que estremeció a esta ciudad en 1967. Pensamos que esta convocatoria reuniera una comunidad de invitados y asistentes para que pudiésemos reflexionar lo arquitectónico y lo urbano desde las personas que hacen de su cotidianidad y memoria *puentes entre horizontes*.

Este llamado logró que más de medio centenar de proyectos desarrollados en los cursos e investigaciones de nuestra Facultad y en otras instituciones académicas, nacionales e internacionales, se presentasen y fuesen aprobados por el Comité Científico, y se incluyesen en las V Jornadas de Investigación de la Escuela de Arquitectura Carlos Raúl Villanueva, la Jornadas de Investigación del Instituto de Urbanismo y en las XXXV Jornadas de Investigación del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción.

Aspirábamos a realizar seis conferencias magistrales con temas que abarcaran todas las Áreas Temáticas de generación de conocimientos en la FAU. Procurábamos un retrato del camino recorrido en materia de investigación urbana en Venezuela destacando esfuerzos internos desde la academia, desde las instituciones del país y los apoyos internacionales, reconociéndola como un campo transversal, interdisciplinario y transdisciplinario en la generación de conocimientos. Igualmente importarte era abordar el tema de la ciudad desde la experiencia de investigar áreas potencialmente desarrollables en zonas de barrios, así como experiencias trazando nuevas formas de leer y entender el espacio público desde los niños, los jóvenes y los adolescente del país; con las cuales reforzar métodos de investigación que involucran directamente al ciudadano en la transformación de su entorno.

Todas las actividades planificadas y desarrolladas para la realización de la Trienal de Investigación de la FAU se afectaron desde el 28 de marzo con «...*el proceso de demolición del modelo de Estado Republicano y rompiendo el orden constitucional ejecutado por el Tribunal Supremo de Justicia...*» (CU.UCV, 01/04/2017). A los pocos días el Presidente de la República ejecutó una nueva acción en contra de la Constitución Nacional, con la cual trasgredió «...*los artículos 5 y 347 de la Constitución al usurpar el poder originario que corresponde exclusivamente al pueblo y el derecho que tiene el electorado al sufragio de manera directa, universal y secreta...*» (Resolución 1047 del CU.UCV, 10/05/2017). Esas acciones del régimen contra la Constitución y el país perturbaron la vida cotidiana de todos y promovieron una rápida reacción de todas las instituciones libres y de toda la ciudadanía por la defensa de nuestra *Carta Magna*. Hechos de protestas sucedieron en todas las ciudades de Venezuela por más de cinco meses, con muy lamentables pérdidas de vidas humanas y materiales.

No obstante a eso, y a que tuvimos que suspender las exposiciones y debates, recibimos estupendos trabajos que fueron arbitrados por el Comité Científico de la Trienal de Investigación FAU2017. En el libro de Memorias que aquí presentamos

se incluyen los artículos que fueron evaluados y aprobados para la divulgación y conocimiento de todos.

También, en compensación por no haber podido lograr las charlas magistrales, las disertaciones y debates de los invitados nacionales y extranjeros, durante este año 2018 y parte del próximo nos proponemos realizar micros, ensayos o teleconferencias que aspiramos ofrecer a través de nuestra página web fau.ucv.ve y del Repositorio Institucional de la UCV saber.ucv.ve.

Este esfuerzo, que comenzó la Facultad de Arquitectura en 2008 con las primeras Jornadas de Investigación FAU y posteriormente 2011, 2014 y 2017, con las Trienales de Investigación FAU, nos permite concretar y dar cuenta sobre las experiencias de producción de conocimientos en nuestra disciplina. En esta oportunidad se recibieron 145 resúmenes; de los cuales, luego de la primera evaluación, se recibieron 82 artículos extensos para ser arbitrados en una segunda fase; resultando aprobados 59 artículos que son los que están incluidos en este libro de Memorias de la TIFAU2017. El Comité Científico procesó la evaluación y autorizó su publicación, distribuidos de la siguiente forma:

Área Temática	Resúmenes recibidos	Extensos recibidos	Extensos aprobados
Ambiente y Sostenibilidad	17	11	7
Ciudad y Sociedad	61	30	20
Historia y Patrimonio	29	20	14
Informática y Representación Gráfica	4	3	2
Tecnología Constructiva	10	6	5
Teoría y Proyección Arquitectónica	24	12	11
Totales	145	82	59

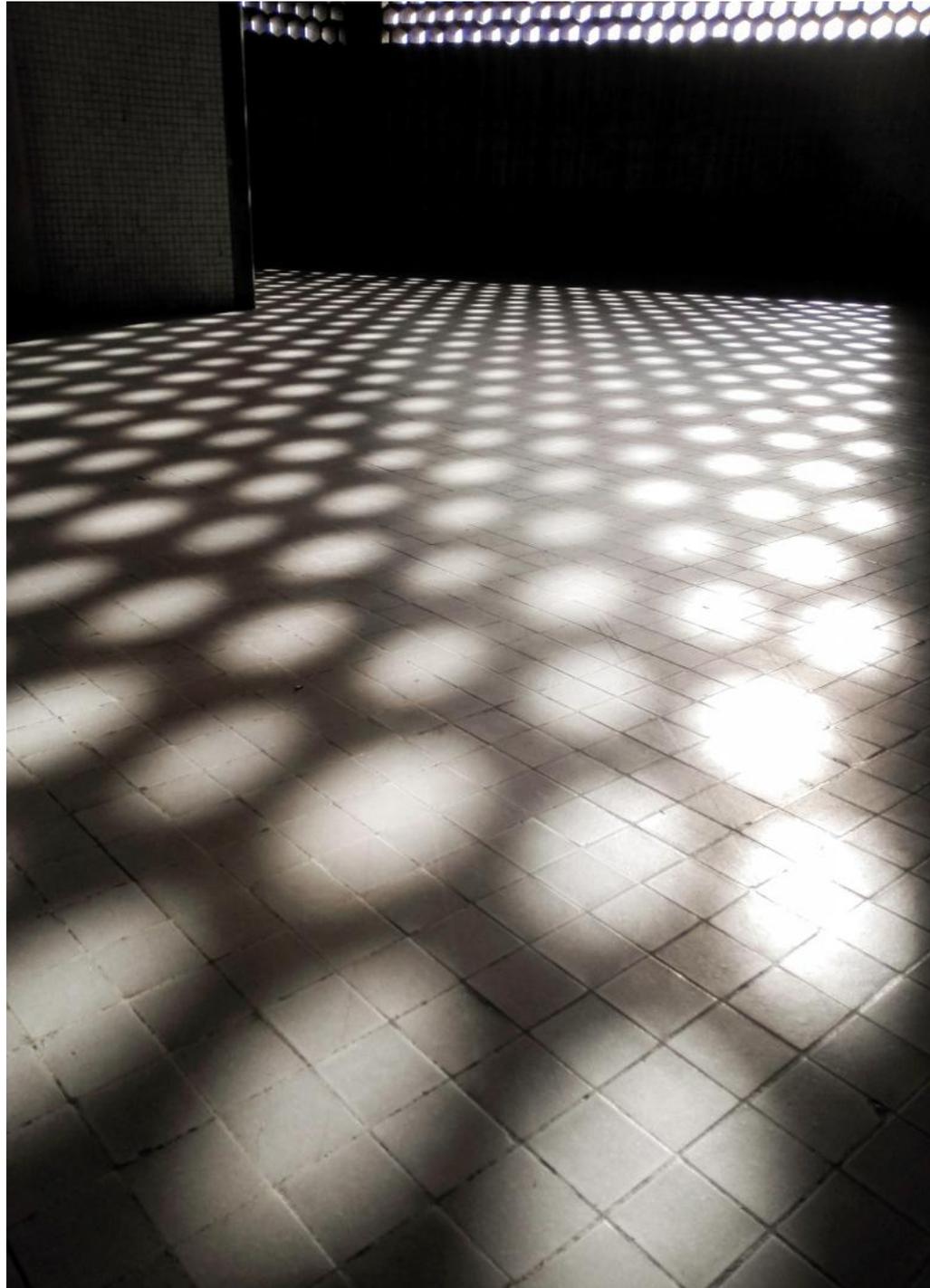
Esperamos que gracias a la Trienal de Investigación de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo 2017 el aporte de toda esta información, disponible a través de la web, sea de provecho intelectual para nuestros profesores y estudiantes de la Escuela de Arquitectura Carlos Raúl Villanueva, de los Institutos, Centros de Investigación y de nuestros cursos de Postgrados; que los motive a continuar trabando en su formación y producción de saberes; que intensifique sus ánimos para participar, consultar y disfrutar del conocimiento, la Arquitectura y el Urbanismo. Y que ello también sea así para los otros académicos y estudiantes de universidades nacionales y de otras latitudes; así como para todo público interesado en los resultados y avances de las investigaciones presentadas desde la UCV. Nos ayuda a perseverar y resistir el hecho de saber que desde nuestra Facultad se está aportando a la sociedad, a través de la generación y divulgación

de conocimientos y de la formación de talentos, para trabajar, cooperar, crear, unidos, e influir en el desarrollo de los grandes retos del país y del mundo, misión esencial de nuestra Universidad Central de Venezuela; con el propósito de reenfozar el futuro y lograr una mejor construcción de él, desde ahora.

Gustavo Izaguirre Luna
Decano



ÁREAS TEMÁTICAS



Las áreas temáticas en las que se agrupan las investigaciones, se identifican y conceptualizan como sigue:

Ambiente y sostenibilidad

Ante el carácter transformador de la Arquitectura en su relación con el ambiente en el cual se inserta —y su incidencia en la calidad de la vida de quienes lo habitan—, se propone sostener la coexistencia e interacción del hecho arquitectónico con su contexto sociofísico y responder así a las necesidades humanas actuales, garantizando la subsistencia de las generaciones futuras.

Ciudad y sociedad

El fenómeno urbano visto como un todo que comprende procesos dinámicos de naturaleza física, económica y social, de cuya irresoluta imbricación forman parte tanto las manifestaciones arquitectónicas como las actividades y funciones de lo cotidiano como elementos fundamentales.

Historia y patrimonio

La variable histórica vista como eje fundamental de análisis en la evolución de las disciplinas arquitectónicas y urbanísticas, comprometidas con la preservación de las distintas manifestaciones de estos campos que hemos heredado del pasado y que constituyen, en el presente, elementos patrimoniales invaluable.

Informática y representación gráfica

Contempla los aspectos de modelado y visualización arquitectónica, desde las especulaciones básicas en lo referente al uso del CAD en imágenes que buscan niveles de realismo como eje de la producción digital, hasta la utilización de la Internet como una nueva herramienta de narrativa visual del discurso Arquitectónico y de Ciudad

Tecnología constructiva

Incorpora todas las investigaciones relacionadas con la innovación y el desarrollo tecnológico, los materiales de construcción, los sistemas y aspectos constructivos, los sistema de gestión de la construcción, los estudio de fallos, defectos y patologías en la construcción, además de calidad de la construcción, construcción sostenible (ecoconstrucción), habitabilidad y edificaciones energéticamente eficientes, entre otros.

Teoría y proyección arquitectónica

Definida para recoger la reflexión implícita en la actividad docente y profesional vinculada con el proyecto arquitectónico, donde la búsqueda paciente de quienes la realizan puede ser registrada con un mínimo de rigor y sistematicidad. Abre la oportunidad de reunir diversos productos en los cuales el análisis crítico es utilizado como herramienta fundamental para aproximarse, de manera integral, a la obra edificada o proyectada, a los temas que signan el actuar de un arquitecto o a la comprensión cabal del contexto en el que todo esto sucede.



MEMORIAS DE LA TRIENAL DE INVESTIGACIÓN FAU 2017 ÍNDICE DE ARTÍCULOS POR ÁREA TEMÁTICA

Área temática: **Ambiente y sostenibilidad**

AS-01 Diagnóstico y variables para una gestión integral del riesgo en la comunidad de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Yoisy C. Rangel G, Beatriz Hernández y Eugenia Villalobos

AS-02 El Club de Roma, aportes para el desarrollo. Una historiografía de su obra publicada

Jorge Luis Casique Torres

AS-03 Herramientas de evaluación del potencial energético y optimización solar en el planeamiento de las áreas urbanas

Nersa Gómez, Ester Higuera y Mercedes Ferrer y Arroyo

AS-04 Evaluación del riesgo por movimientos en masa. Instrumento para la planificación y gestión urbana en zonas de barrios autoproducidos de Caracas

Carlos Padrón Chacón

AS-05 Acercamiento metodológico al concepto de vivienda multifamiliar productiva de bajo costo

Eliana Ramírez, Beatriz Hernández y Beverly Hernández

AS-06 Estudio de vulnerabilidad urbana en zonas de desarrollo controlado y no controlado: sector Av. Sucre de Los Dos Caminos

Carlos Urdaneta Troconis

AS-07 Mutación del espacio público en asentamientos populares. Maracaibo, Venezuela

Tomás Pérez Valecillos y César Castellano

Área temática: **Ciudad y sociedad**

CS-01 La cosa caraqueña por excelencia: estudio antropológico de la montaña el Ávila como símbolo de la ciudad

Manuel D'Hers Del Pozo

CS-02 El proceso de apropiación del espacio en los desarrollos espontáneos, Mérida-Venezuela

Ramiro Prato Vicuña

CS-03 Guía de diseño de mobiliario urbano para entrenamiento físico, con base en tendencias y características del espacio público en Venezuela

Viviana Moreno Troconis

CS-04 La táctica urbana en el intersticio como articuladora de ciudad

Teresa García Alcaraz

CS-05 Ciudad, paisaje e identidad: imagen urbana de la ciudad de Maracay

Aliz Mena

CS-06 Crecimiento de la mancha urbana en la periferia de Caracas entre 2010 y 2016

Fabio Capra Ribeiro e Isabel Yacot

CS-07 Actualización sobre la megalópolis del centro-norte de Venezuela

Fabio Capra Ribeiro

CS-08 Urbanización y Migración. Caracas en la modernidad

Newton Rauseo

CS-09 Consideraciones en torno a la competencia de coordinación y planificación urbana y urbanística del área metropolitana de Caracas

Zulma Bolívar, Carlos Urdaneta Troconis y Cristhian Tavera

CS-10 Sostenibilidad urbana como tema en la formación del arquitecto

María Eugenia Collell Schnaidt

CS-11 La imagen de la ciudad: percepción y devaneo. Bachelard y las provocaciones de la imaginación

Erika Alezard

CS-12 Ocupación sistemática de la acera

Nathalie Naranjo

CS-13 Migración y crecimiento poblacional entre 1995 y 2015 en Playa del Carmen, México

Manuel Gerardo Delgado-Linero

CS-14 Normativa para el equipamiento urbano en Venezuela. Referencias teóricas y análisis de instrumentos. Avances de investigación

Hilda Torres Mier y Terán

CS-15 Derecho a la Ciudad: reconstrucción del imaginario urbano

Yelitza Mendoza Andrade

CS-16 Transgresiones urbano arquitectónicas: una aproximación sobre la ciudad y la arquitectura en Caracas

Rafael Juan Machado Gámez

CS-17 Ser, estar, pensar la ciudad: intervalo para la gestión de la vida urbana local

Argentina Morúa

CS-18 Caracas a pedal: aportes para un cambio en la movilidad urbana caraqueña

Yunitza Dávila, Zulma Bolívar y Cruz Criollo

CS-19 Un nuevo abanico de espacios públicos informales en Caracas

María Isabel Peña

CS-20 Influencias de la inseguridad sobre la cohesión social: reflexiones teóricas sobre el espacio público

Pavelyn Márquez Guerra

Área temática: **Historia y patrimonio**

HP-01 Villanueva y el Pabellón de Venezuela en la Expo '67: una obra de arte total

Moisés Chávez

HP-02 La Caracas de Rafael Seijas Cook “el arquitecto-poeta”

Beatriz Meza Suinaga

- HP-03 La Real Compañía Guipuzcoana: arquitecturas en red**
Lorenzo González Casas y Orlando Marín Castañeda
- HP-04 Los servicios de alojamiento en Maracaibo, Venezuela: 1830-1920**
Ismar Millano y Pedro López
- HP-05 Orígenes de la Avenida Bella Vista en Maracaibo. La “nueva ciudad” de finales del siglo XIX**
Javier Suarez Acosta
- HP-06 El Ejército Nacional y la integración territorial en Venezuela: cuarteles y carreteras, 1908-1935**
Ana Elisa Fato Osorio
- HP-07 Caracas entre 1830 y 1858: fragmentos de modernización**
Izaskun Landa
- HP-08 Cuatro historiadores, cuatro aproximaciones a la historia de la arquitectura contemporánea: Zevi, Tafuri, Jencks y Frampton**
Hernán Lameda Luna
- HP-09 El mosaico mural vítreo en el edificio moderno caraqueño**
Blanca Rivero
- HP-10 Juan Hurtado Manrique: ingeniero de formación, arquitecto de profesión**
Francisco Pérez Gallego
- HP-11 Clifford Charles Wendehack: transferencias culturales del “american way of life” en Caracas**
Francisco Pérez Gallego
- HP-12 Iglesia de las Siervas del Santísimo de Caracas: enlaces entre lugares y tiempos lejanos**
Francisco Pérez Gallego
- HP-13 Consideraciones teóricas y metodológicas sobre la experiencia de aprendizaje inicial de la historia del arte, la arquitectura y el diseño**
Heidelyn Díaz
- HP-14 Actuaciones Territoriales en las Cercanías de Caracas entre 1830 y 1858**
Izaskun Landa

Área temática: **Informática y representación gráfica**

IRG-01 Representación gráfica de arquitectura, ciudad y territorio: corpus de la revista del Colegio de Ingenieros de Venezuela

María Zuleny González Herrera

IRG-02 La representación gráfica en la Escuela de Arquitectura UCV: un enfoque desde los Planes de Estudios (1941-1974)

María Zuleny González Herrera

Área temática: **Tecnología constructiva**

TC-01 Evaluación probabilística de la condición “columna fuerte viga débil”

Angelo Marinilli

TC-02 Aspectos a considerar en el análisis por desempeño de edificaciones multifamiliares aporricadas de baja altura de acero estructural con crecimiento progresivo

Sigfrido Loges

TC-03 Viviendas multifamiliares de desarrollo progresivo. Un ejemplo de vivienda flexible

Beverly Hernández

TC-04 Sobre alambres, torones, cables y puentes colgantes en acero. Rastreando cursos de acción, asociaciones y traducciones desde la ontología del actante rizoma (OAR)

Alejandra González

TC-05 Presente y futuro de la tecnología del concreto. La experiencia del IDEC

Idalberto Águila

Área temática: **Teoría y proyectación arquitectónica**

TPA-01 Evolución del cuerpo de conocimiento del Project Management Institute (PMI): permeando rasgos interpretativos

Eugenia Villalobos

TPA-02 Mario Romañach. El arquitecto cubano que sirvió de puente entre Pensilvania y Caracas

Carlos Olaizola

TPA-03 Actualidad de la arquitectura de hospitales en Latinoamérica

Sonia Cedres

TPA-04 Estudio de las estrategias compositivas de las fachadas del Palacio Arzobispal de Mérida: una propuesta de análisis crítico

Ángel Domingo Montilla

TPA-05 Geometrías colaborativas: sobre metamodernidad y el Proyecto Colectivo de Miguel Braceli

Manuel Vásquez-Ortega

TPA-06 Verdad, arbitrariedad y tradición

Luis Polito

TPA-07 Hacia la teoría Arte+Arquitectura. Dinámica y Naturaleza de la relación entre Arte y Arquitectura

José Luis Chacón

TPA-08 Arquitectura emocional a través de la narrativa cinematográfica. Sinergias entre arquitectura y cine

María Vera Paparoni

TPA-09 La reconstrucción como proyecto. Proceso y concepción de la arquitectura moderna en Latinoamérica

Ramón Fermín

TPA-10 Re-diseño de los ranchos del barrios en Caracas

Javier Caricatto

TPA-11 El aprendizaje del arquitecto y el conocimiento sensible en el contexto académico de la EACRV FAU UCV

María Elena Hernández

TECNOLOGÍA CONSTRUCTIVA





EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DE LA CONDICIÓN “COLUMNA FUERTE VIGA DÉBIL”

Angelo Marinilli

Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), Facultad de Ingeniería, UCV.
angelo.marinilli@ucv.ve, angelomarinilli@gmail.com

RESUMEN

La condición “columna fuerte viga débil” supone permitir la formación de rótulas plásticas en las vigas y evitarlas en las columnas durante un terremoto. Para esto la Norma Venezolana Fondonorma 1753:2006 propone dos procedimientos para estructuras que requieren nivel de diseño 3 según la Norma Venezolana Covenin 1756:2001. El procedimiento 1 compara resistencias a flexión de vigas y columnas en los nodos, siendo el de uso más generalizado, y el procedimiento 2 compara resistencias de vigas y columnas en los niveles de la estructura. Los resultados de ambos procedimientos dependen de la resistencia a compresión del concreto y la resistencia cedente del acero de refuerzo, cuyo efecto puede evaluarse mediante métodos probabilísticos. El objeto de este trabajo es evaluar el efecto de la condición columna fuerte viga débil sobre el comportamiento sismorresistente de pórticos de concreto reforzado mediante métodos probabilísticos, considerando la variabilidad de las resistencias del concreto y del acero. Para ello se diseñaron pórticos planos de concreto reforzado según la normativa vigente en el país y se realizaron ajustes aplicando el procedimiento 1 para diversos valores de la relación de resistencias entre columnas y vigas. El comportamiento sismorresistente se evaluó mediante análisis estáticos no lineales o *pushover*. Se emplearon dos metodologías probabilísticas. La primera basada en simulación numérica y la segunda basada en la obtención analítica de curvas de fragilidad. La primera metodología permitió identificar los valores de la relación de resistencias para evitar mecanismos de piso y generar mecanismos plásticos de colapso ideales. La segunda metodología mostró que valores mayores de la relación de resistencias disminuyeron las probabilidades de alcanzar y exceder cada estado de daño.

Palabras clave: pórticos, concreto reforzado, columna fuerte viga débil, probabilidades.

INTRODUCCIÓN

Las normas modernas para el diseño de estructuras de concreto reforzado presentan estrategias para generar la condición “columna fuerte viga débil” en pórticos resistentes a momento. Esta condición supone permitir la formación de rótulas plásticas en los extremos de las vigas y evitar la formación de rótulas plásticas en las columnas durante un terremoto.

El comportamiento sismorresistente de estructuras de concreto reforzado posee diversas fuentes de incertidumbre, entre las que se encuentran la resistencia a compresión del concreto (f'_c) y la tensión a la cedencia del acero de refuerzo (f_y). El efecto de esta incertidumbre sobre la condición columna fuerte viga débil se puede evaluar mediante métodos probabilísticos basados en simulación numérica, como el Método de Simulación de Montecarlo o el Método Latino Hipercúbico.

De igual manera, las curvas de fragilidad permiten incorporar la incertidumbre de las propiedades mecánicas de los materiales al analizar el efecto de la condición columna fuerte viga débil sobre el comportamiento sismorresistente de pórticos de concreto reforzado. Las curvas de fragilidad permiten además estimar la probabilidad de que una estructura alcance o exceda un determinado nivel de daño, en función de una intensidad dada del movimiento sísmico.

El objeto de este trabajo es evaluar el efecto de la condición columna fuerte viga débil sobre el comportamiento sismorresistente de pórticos de concreto reforzado mediante métodos probabilísticos, considerando la variabilidad de las resistencias del concreto y del acero.

1. LA CONDICIÓN COLUMNA FUERTE VIGA DÉBIL

La Norma Venezolana Fondonorma 1753:2006 (NVF 1753:2006, 2006) presenta dos procedimientos para lograr la condición columna fuerte viga débil para estructuras que deben cumplir con el nivel de diseño 3 (ND3), de acuerdo con la Norma Venezolana Covenin 1756:2001 (NVC 1756:2001, 2001). El procedimiento 1 compara las resistencias a flexión de vigas y columnas en todos los nodos de la estructura y el procedimiento 2 compara las resistencias de todas las vigas y todas las columnas en cada nivel. Ambos procedimientos consisten en verificar que la sumatoria de las resistencias de las columnas ($\sum Mc$) sea mayor que la sumatoria de las resistencias de las vigas ($\sum Mv$), de acuerdo con la ecuación 1. La relación de resistencias entre columnas y vigas es $\omega = 6/5$, de acuerdo con la NVF 1753:2006.

$$\sum Mc \geq \omega \sum Mv \quad (\text{Ecuación 1})$$

El procedimiento 1 tiene su origen en el código ACI 318 (2014) y es el más comúnmente utilizado, siendo adoptado por diversas normas internacionales, aunque en algunos casos con valores diferentes de la relación de resistencias. Por ejemplo, la norma peruana para estructuras de concreto reforzado considera $\omega = 1,4$ (SENCICO, 2006) y la norma complementaria para estructuras de concreto reforzado de Ciudad de México considera $\omega = 1,5$ (NTCM, 2004). El procedimiento 2 tiene su origen en el comentario del *Blue Book* de la SEAOC (1999) y de acuerdo con la información disponible solo ha sido adoptada por la NVF 1753:2006. Es importante aclarar que cualquiera de los dos procedimientos tiene como finalidad evitar la formación de mecanismos de piso y no necesariamente favorecer la formación de mecanismos plásticos de colapso ideales, tales como los mostrados en la figura 1.

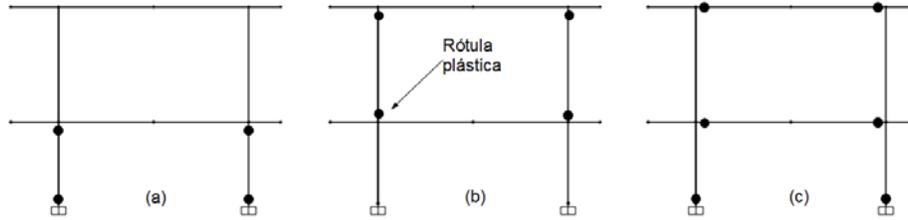


Figura 1: Mecanismos plásticos de colapso para un pórtico de dos pisos y un vano: (a) mecanismo de primer piso, (b) mecanismo de segundo piso y (c) mecanismo ideal. (Elaboración propia)

2. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

Existen diversas técnicas para implementar un análisis probabilístico. Entre estas se pueden citar el Método de Simulación de Montecarlo, el Método Latino Hipercúbico y el Método de los Estimadores Puntuales, los cuales se explican brevemente a continuación.

2.1. Método de Simulación de Montecarlo

La probabilidad de falla de un sistema estructural se obtiene al evaluar la integral multidimensional mostrada en la ecuación 2.

$$p_f = P[y \leq 0] = \int \dots \int_{y \leq 0} f_X(X) dX \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde $y = f(X)$ es la función del comportamiento del sistema de n variables aleatorias, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ es el vector de las variables aleatorias y $f_X(X)$ es la función de densidad conjunta de X . El Método de Simulación de Montecarlo permite evaluar la ecuación 2 mediante la generación aleatoria de valores de X . Alternativamente, permite evaluar el efecto de las variables aleatorias sobre el comportamiento del sistema analizado, aun sin la necesidad de evaluar la probabilidad de falla. Este método tiene el inconveniente de requerir un número grande de simulaciones numéricas de la respuesta de interés (Melchers, 1999).

2.2. Método Latino Hipercúbico

El Método Latino Hipercúbico propone que para generar m muestras de la función de n variables aleatorias $y = f(X)$, se subdivide el rango de cada variable aleatoria (x_i) en m sectores de igual probabilidad y se seleccione aleatoriamente un valor de cada sector. Posteriormente se combinan aleatoriamente los valores seleccionados de las n variables aleatorias para generar un total de m muestras de X . El propósito es garantizar que cada valor seleccionado de una variable aleatoria quede representado una vez en las muestras, independientemente del valor que sea más importante. La principal ventaja de este método de muestreo es que permite evaluar la ecuación 2, o el efecto de las variables aleatorias sobre el comportamiento del sistema analizado, con un número menor de simulaciones que el Método de Simulación de Montecarlo (Choi et al., 2007).

2.3. Método de los Estimadores Puntuales

El Método de los Estimadores Puntuales fue originalmente propuesto por Rosenblueth (1975). El método considera básicamente que una función de una variable aleatoria $y = f(x)$ puede ser concentrada en los dos puntos mostrados en la ecuación 3.

$$y_+ = f(x_+) = f(m_x + s_x) \quad y_- = f(x_-) = f(m_x - s_x) \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde m_x es la media y s_x es la desviación estándar de la variable x . La media y la varianza de la función $y = f(x)$ pueden ser obtenidas por medio de la ecuación 4.

$$m_y = y_+ \cdot P_+ + y_- \cdot P_- \quad s_y^2 = (y_+ - m_y)^2 \cdot P_+ + (y_- - m_y)^2 \cdot P_- \quad (\text{Ecuación 4})$$

donde $P_+ = P_- = P = 1/2$ si se considera que la distribución probabilística de la variable x es simétrica. Este concepto se puede extender para funciones de n variables aleatorias resultando en 2^n términos. El método tiene la ventaja de requerir un número relativamente bajo de evaluaciones numéricas de la respuesta de interés. Sin embargo, para realizar evaluaciones probabilísticas se requiere conocer previamente la distribución probabilística de dicha respuesta.

3. CURVAS DE FRAGILIDAD

Las curvas de fragilidad se definen desde el punto de vista probabilístico mediante la ecuación 5, suponiendo que las distribuciones probabilísticas de la demanda (D) y la capacidad (C) son lognormales y que estas son independientes entre sí (Schultz et al., 2010).

$$P[D \geq C/A_0] = \Phi \left[\frac{\ln (m_D/m_C)}{\sqrt{\beta_{D/A_0}^2 + \beta_C^2}} \right] \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde:

$P[D \geq C/A_0]$ = probabilidad condicional que la demanda sea mayor o igual que la capacidad, dado que ocurre A_0

A_0 = coeficiente de aceleración horizontal del terreno

$\Phi[...]$ = función de distribución normal estándar acumulada

m_D = mediana de la demanda

m_C = mediana de la capacidad

β_{D/A_0}^2 = dispersión de la demanda, dado que ocurre A_0

β_C^2 = dispersión de la capacidad

3.1. Capacidad

La curva de capacidad representa el comportamiento sismorresistente de una estructura bajo la acción de cargas laterales y se determina mediante un análisis estático no lineal (*pushover*). Una vez obtenida la curva de capacidad se idealiza mediante tres ramas lineales con base en el criterio de iguales áreas. Los análisis estáticos no lineales y la idealización de las curvas de capacidad se realizan según los lineamientos de los documentos FEMA 356 (2000) y ASCE/SEI-41 (2013).

3.2. Demanda

La demanda de desplazamiento (δ_t) representa el máximo desplazamiento que será experimentado probablemente por una edificación durante un sismo. Dicha demanda se determina mediante el método de los coeficientes definido en FEMA 356 (2000) y modificado en FEMA 440 (2005). La ecuación 6 permite calcular la demanda de desplazamiento con base en las curvas de capacidad obtenidas mediante análisis estáticos no lineales.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{(2\pi)^2} g \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde:

C_0 = factor de modificación que relaciona el desplazamiento de un sistema equivalente de 1 grado de libertad dinámico (gdld) con el desplazamiento en el techo de la estructura de varios gdld

C_1 = factor de modificación que relaciona el máximo desplazamiento inelástico esperado con el desplazamiento calculado mediante un análisis elástico lineal

C_2 = factor de modificación que representa el efecto del estrangulamiento de los ciclos de histéresis, la degradación de rigidez y la degradación de resistencia sobre el desplazamiento máximo del sistema

T_e = período fundamental efectivo de la estructura en la dirección de análisis

S_a = respuesta espectral de aceleración correspondiente al período fundamental efectivo y la fracción de amortiguamiento crítico de la estructura en la dirección de análisis

g = aceleración de la gravedad

3.3. Estados de daño

El cuadro 1 contiene los estados de daño estructural, sus descripciones y desplazamientos asociados, de acuerdo con HAZUS-MH MR4 (2003) y Coronel y López (2013). En el cuadro 1, u_y es el desplazamiento cedente, u_u es el desplazamiento último y u_i es el desplazamiento asociado al estado de daño i .

Cuadro 1: Estados de daño estructural y desplazamientos asociados.
(Elaboración propia)

ESTADO DE DAÑO	DESCRIPCIÓN	DESPLAZAMIENTO
Sin daño	No se observan daños estructurales.	$< 0,5 u_y$
Leve	Grietas delgadas por flexión o corte en algunas vigas y columnas cerca de los nodos o en los nodos.	$u_1 = 0,5 u_y$
Moderado	La mayor parte de columnas y vigas muestran grietas delgadas. En pórticos dúctiles algunos miembros alcanzan la cedencia.	$u_2 = u_y$
Severo	Algunos miembros alcanzan su capacidad resistente. En pórticos no dúctiles algunos miembros fallan por corte, empalmes por solape, pandeo del acero longitudinal o rotura de ligaduras.	$u_3 = u_y + 0,25 (u_u - u_y)$
Completo	La estructura colapsa o el colapso es inminente debido a la falla frágil de miembros no dúctiles o la pérdida de estabilidad.	$u_4 = u_u$

4. EJEMPLO

A continuación se presenta un ejemplo que permite ilustrar la implementación de las metodologías propuestas.

4.1. Descripción de la estructura

Se analizó un pórtico plano de concreto reforzado de dos pisos y un vano, cuya geometría se observa en la figura 2. Las secciones transversales de las columnas de la planta baja (C-PB) y de la planta alta (C-PA) son de $30\text{ cm}^2 \times 30\text{ cm}^2$, la viga del entrepiso (V-EP) es de $30\text{ cm}^2 \times 60\text{ cm}^2$ y la viga del techo (V-TE) es de $30\text{ cm}^2 \times 50\text{ cm}^2$.

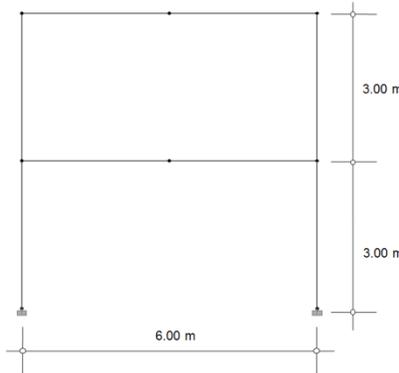


Figura 2: Geometría del pórtico analizado.
(Elaboración propia)

4.2. Propiedades de los materiales estructurales

El cuadro 2 contiene los valores nominales, las distribuciones probabilísticas, las medias y los coeficientes de variación (CV) de la resistencia a compresión del concreto (f_c) y la tensión de cedencia del acero de refuerzo (f_y), según Castilla y Marinilli (2001), Melchers (1999) y Porrero et al. (1996).

Cuadro 2: Propiedades de los materiales estructurales.
(Elaboración propia)

VARIABLE ALEATORIA	VALOR NOMINAL (MPa)	DISTRIBUCIÓN	MEDIA (MPa)	CV
f_c	25,0	Normal	31,3	0,15
f_y	420	Lognormal	483	0,05

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los resultados del diseño, ajustes e implementación de las metodologías probabilísticas propuestas.

El diseño y los ajustes sucesivos mediante el procedimiento 1 se realizaron de acuerdo con la NVF 1753:2006, empleando los valores nominales de las propiedades mecánicas de los materiales estructurales. Para realizar los análisis probabilísticos y obtener las curvas de fragilidad se emplearon las propiedades estadísticas de los materiales estructurales mostradas en el cuadro 2. El diseño y los análisis estáticos no lineales se realizaron con la ayuda de los programas SAP2000 Structural Analysis Program y ETABS Nonlinear Version (CSI, 2006).

5.1. Resultados del diseño y ajustes

Las cargas permanentes y las cargas variables actuantes sobre la estructura se determinaron según la Norma Venezolana Covenin 2002:1988 (NVC 2002:1998, 1998). El análisis sísmico se realizó según la NVC 1756:2001, suponiendo que la edificación está ubicada en Caracas sobre un terreno firme, que requiere cumplir con el nivel de diseño 3 (ND3) y que en ella se pueden generar concentraciones plásticas.

El cuadro 3 contiene las cuantías del refuerzo longitudinal colocadas en los extremos de las vigas de la estructura, las cuales se mantuvieron durante los ajustes y análisis posteriores. El cuadro 4 contiene las cuantías del acero de refuerzo longitudinal colocado en las columnas y las relaciones de resistencia en los nodos (ω) para los casos considerados y los ajustes realizados según el procedimiento 1 de la NVC 1753:2006.

Cuadro 3: Cuantías del acero de refuerzo longitudinal colocado en las vigas.
(Elaboración propia)

VIGA	CUANTÍA ACERO INFERIOR	CUANTÍA ACERO SUPERIOR
V-TE	0,00375	0,00375
V-EP	0,00360	0,00538

Cuadro 4: Cuantías del acero de refuerzo longitudinal colocado en las columnas y relaciones de resistencia en los nodos. (Elaboración propia)

CASO	ω MÍNIMO – MÁXIMO	CUANTÍA C-PB	CUANTÍA C-PA
Resultado diseño	1,13 – 1,65	0,0253	0,0253
Ajuste $\omega = 1,20$	1,20 – 1,70	0,0338	0,0259
Ajuste $\omega = 1,50$	1,50 – 2,15	0,0338	0,0345
Ajuste $\omega = 2,00$	2,00 – 2,86	0,0563	0,0563

5.2. Análisis estáticos no lineales

Una vez realizado el diseño y los ajustes se realizaron análisis estáticos no lineales, según los lineamientos de los documentos FEMA 356 (2000) y ASCE/SEI-41 (2013). Durante estos análisis se consideró la posibilidad de formación de rótulas plásticas a flexión en los extremos de las vigas, y rótulas plásticas a flexión y carga axial en los extremos de las columnas. En cada caso se determinó el mecanismo plástico de colapso que se produce, como se muestra en el cuadro 5. Se observa que al aplicar el procedimiento 1 con $\omega \geq 1,20$ se evita la formación de mecanismos de piso y que con $\omega \geq 1,50$ se produce el mecanismo plástico de colapso ideal.

Cuadro 5: Resultados de los análisis estáticos no lineales.
(Elaboración propia)

CASO	MECANISMO DE PISO	MECANISMO MIXTO	MECANISMO IDEAL
Resultado diseño	X		
Ajuste $\omega = 1,20$		X	
Ajuste $\omega = 1,50$			X
Ajuste $\omega = 2,00$			X

5.3. Análisis probabilístico

Para realizar los análisis probabilísticos se generaron 50 pares de valores f_c y f_y mediante el Método Latino Hipercúbico. La figura 3 muestra los histogramas de los valores generados.

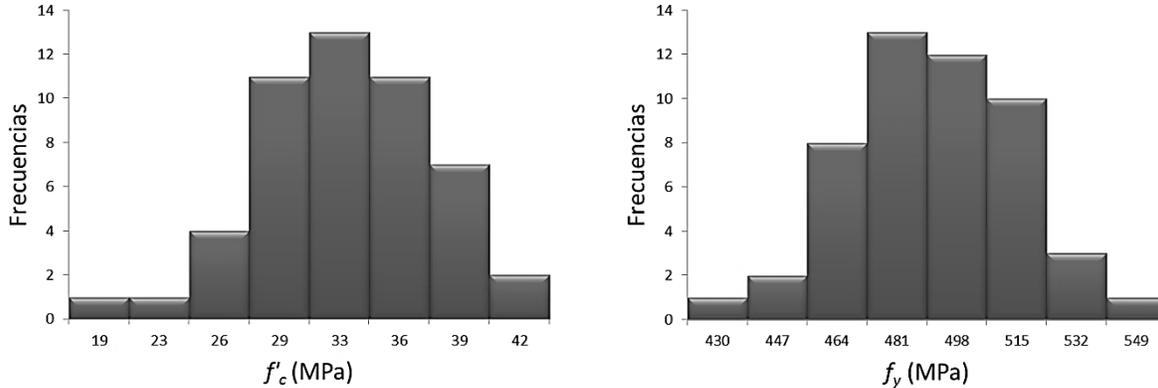


Figura 3: Histogramas de f_c y f_y obtenidos mediante el Método Latino Hipercúbico. (Elaboración propia)

Cuadro 6: Resultados de los análisis probabilísticos. (Elaboración propia)

CASO	Porcentajes		
	MECANISMO DE PISO	MECANISMO MIXTO	MECANISMO IDEAL
Resultado diseño	51	49	0
Ajuste $\omega = 1,20$	24	76	0
Ajuste $\omega = 1,50$	0	0	100
Ajuste $\omega = 2,00$	0	0	100

El análisis probabilístico se implementó realizando un análisis estático no lineal para cada pórtico diseñado y para cada par de valores generados de f_c y f_y . Los resultados se resumen en el cuadro 6, donde se observa cómo el valor de la relación de resistencias ω y la variabilidad de f_c y f_y afectan la formación de los distintos tipos de mecanismos de colapso. En particular se observa que al utilizar el valor normativo de la relación de resistencias ($\omega = 1,2$) no se impide la formación de mecanismos de piso en todos los casos. De igual manera se observa que utilizar $\omega \geq 1,5$ se genera el mecanismo plástico de colapso ideal en todos los casos analizados.

5.4. Curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad se elaboraron de forma analítica, obteniendo las curvas de capacidad mediante análisis estáticos no lineales, con la posibilidad de formación de rótulas plásticas a flexión en las vigas y rótulas a flexión y carga axial en las columnas. La demanda de desplazamiento se determinó mediante el método de los coeficientes. Se consideraron cinco estados de daño. Los análisis probabilísticos se realizaron mediante el Método de los Estimadores Puntuales, considerando que f_c y f_y son variables aleatorias independientes. Se supuso que las distribuciones probabilísticas de la demanda, la capacidad y las curvas de

fragilidad son lognormales. La figura 4 muestra las curvas de fragilidad obtenidas para el resultado del diseño y los ajustes realizados mediante el procedimiento 1 de la NVF 1753:2006.

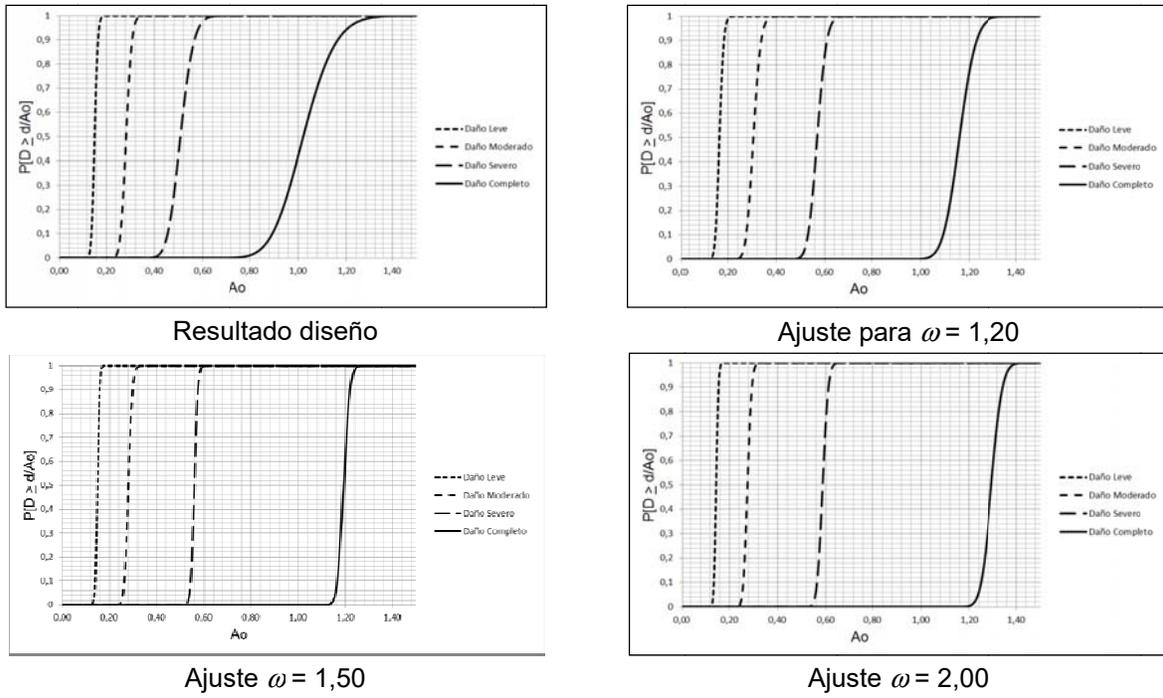


Figura 4: Curvas de fragilidad. (Elaboración propia)

El cuadro 7 contiene los valores de A_0 con 50% de probabilidad de exceder cada estado de daño obtenidos de las curvas de fragilidad (medianas). El cuadro 8 contiene las probabilidades de exceder cada estado de daño obtenidas de las curvas de fragilidad, considerando $A_0 = 0,30$ y $1,3A_0 = 0,39$. En términos generales se observa que valores mayores de la relación de resistencias (ω) tiende a aumentar las medianas obtenidas de las curvas de fragilidad, es decir, que se requieren sismos de mayor intensidad para exceder cada nivel de daño. Del mismo modo se observa que las probabilidades de exceder cada estado de daño tienden a disminuir, lo que supone una mejora en los niveles de seguridad estructural.

Cuadro 7: Medianas de las curvas de fragilidad (A_0). (Elaboración propia)

CASO	ESTADO DE DAÑO			
	LEVE	MODERADO	SEVERO	COMPLETO
Resultado diseño	0,152	0,282	0,507	1,021
Ajuste $\omega = 1,20$	0,164	0,305	0,569	1,159
Ajuste $\omega = 1,50$	0,149	0,280	0,560	1,193
Ajuste $\omega = 2,00$	0,145	0,275	0,587	1,295

Cuadro 8: Probabilidades de exceder cada estado de daño obtenidas de las curvas de fragilidad.
(Elaboración propia)

CASO	A_0	ESTADO DE DAÑO			
		LEVE	MODERADO	SEVERO	COMPLETO
Resultado diseño	0,30	1	0,817	$1,47 \times 10^{-9}$	$2,71 \times 10^{-27}$
	0,39	1	0,999	$1,26 \times 10^{-3}$	$3,58 \times 10^{-18}$
Ajuste $\omega = 1,20$	0,30	1	0,420	$4,87 \times 10^{-30}$	$2,36 \times 10^{-151}$
	0,39	1	0,999	$5,18 \times 10^{-12}$	$9,41 \times 10^{-103}$
Ajuste $\omega = 1,50$	0,30	1	0,914	$3,46 \times 10^{-166}$	0
	0,39	1	1	$5,24 \times 10^{-59}$	0
Ajuste $\omega = 2,00$	0,30	1	0,957	$2,98 \times 10^{-92}$	0
	0,39	1	1	$1,54 \times 10^{-36}$	0

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el efecto de la condición columna fuerte viga débil sobre el comportamiento sismorresistente de pórticos de concreto reforzado mediante métodos probabilísticos. El ajuste de las resistencias de las columnas se realizó mediante el procedimiento 1 de la NVF 1753:2006, por tratarse del método de ajuste más comúnmente usado.

Se propusieron dos metodologías probabilísticas; la primera basada en simulación numérica mediante el Método Latino Hipercúbico y la segunda basada en la obtención analítica de curvas de fragilidad. En ambos casos se consideró que las resistencias del concreto y del acero son variables aleatorias independientes.

El desarrollo de un ejemplo permitió mostrar la implementación de las metodologías probabilísticas propuestas. La primera metodología permitió observar que al utilizar el valor normativo de la relación de resistencias ($\omega = 6/5$) no se impide en todos los casos la formación de mecanismos de piso y que al utilizar $\omega \geq 1,5$ se genera el mecanismo plástico de colapso ideal en todos los casos analizados. La segunda metodología permitió observar que valores mayores de la relación de resistencias mejoran la confiabilidad estructural al disminuir las probabilidades de alcanzar y exceder cada estado de daño.

Finalmente debe indicarse que para poder generalizar estos resultados se deben analizar otras estructuras con características diversas a la estudiada.

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) y el financiamiento del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV), a través del proyecto PI 08-8161-2011 para el desarrollo de esta investigación.

8. REFERENCIAS

ACI 318. (2014). *Building code requirements for reinforced concrete and commentary*. Detroit: American Concrete Institute.

ASCE/SEI-41. (2013). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*. Reston: American Society of Civil Engineers and Structural Engineering Institute.

- Castilla, E. y Marinilli, A. (2001). Propiedades del acero de refuerzo para el diseño de estructuras sismorresistentes. *Boletín Técnico del IMME*, vol. 39, n° 1, pp. 14-25.
- Choi, S., Grandhi, R. y Canfield, R. (2007). *Reliability-based structural design*. London: Springer-Verlag.
- Coronel, G. y López, O.A. (2013). Metodología para la estimación de daños por sismos en edificios escolares de Venezuela mediante curvas de fragilidad. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*, vol. 28, n° 2, pp. 65-86.
- CSI. (2006). *Linear and nonlinear static and dynamic analysis and design of three-dimensional structures. Basic Analysis Reference Manual*. Berkeley: Computers and Structures, Inc.
- FEMA 356. (2000). *Pre-standard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Washington: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA 440. (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures*. Washington: Federal Emergency Management Agency.
- HAZUS-MH MR4. (2003). *Technical Manual*. Washington: Federal Emergency Management Agency.
- Melchers, R.E. (1999). *Structural reliability analysis and prediction*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Norma Venezolana Covenin 1756:2001. (2001). *Edificaciones sismorresistentes*. Caracas: Comisión Venezolana de Normas Industriales.
- Norma Venezolana Covenin 2002:1988. (1988). *Criterios y acciones mínimas para el proyecto de edificaciones*. Caracas: Comisión Venezolana de Normas Industriales.
- Norma Venezolana Fondonorma 1753:2006. (2006). *Proyecto y construcción de obras de concreto estructural*. Caracas: Fondo para la Normalización y Certificación de la Calidad.
- NTCM. (2004). *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto*. Ciudad de México: Comité de Normas del Distrito Federal, México DF.
- Porrero, J., Salas, R., Ramos, C., Grases, J. y Velazco, G. (1996). *Manual del Concreto*. Caracas: Siderúrgica del Turbio.
- Rosenblueth, E. (1975). Second-order probabilities approximations. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 72(10), pp. 3812-3814.
- Schultz, M., Gouldby, B., Simm, J. y Wibono, J. (2010). *Beyond the factor of safety: Developing fragility curves to characterize system reliability*. Washington: US Army Corps of Engineers.
- SEAOC. (1999). *Recommended lateral force requirements and commentary*. Sacramento: Seismology Committee, Structural Engineers Association of California.
- SENCICO. (2006). *Norma Técnica de Edificación E.060. Concreto Armado*. Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Gobierno del Perú.

ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL ANÁLISIS POR DESEMPEÑO DE EDIFICACIONES MULTIFAMILIARES APORTICADAS DE BAJA ALTURA DE ACERO ESTRUCTURAL CON CRECIMIENTO PROGRESIVO

Sigfrido Loges

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), FAU.UCV.
sigfrido.loges@ucv.ve

RESUMEN

Cuando las edificaciones multifamiliares aporticadas de baja altura de acero estructural son concebidas para permitir la construcción progresiva, la progresividad debe seguir unos lineamientos previamente establecidos al nivel de proyecto, especialmente en lo referente a la ingeniería estructural de su construcción, la cual deberá considerar en todo momento la adición o sustitución de miembros estructurales, con el impacto que esto generará en el comportamiento de la nueva edificación. Sin embargo, es muy importante destacar que la edificación en su primera etapa de construcción distará mucho, en términos de comportamiento estructural, al de la(s) definitiva(s) correspondiente(s) a cada etapa de crecimiento, por lo cual resultará imperativo evaluar dichas estructuras, haciendo un análisis por desempeño para verificar si la adición de los nuevos miembros y componentes no generará condiciones desfavorables ante acciones sísmicas. Resultará entonces muy importante el conocimiento y correcto proceder de la metodología y aspectos asociados a los análisis estructurales por desempeño, basados en análisis estáticos no lineales (*pushover*, por sus siglas en inglés), lo cual permitirá comprender, entre otras cosas, la localización de las zonas en donde debe ocurrir la disipación de energía inelástica (rótulas plásticas) y si las mismas siguen un patrón de ocurrencia adecuado, tomando en cuenta que lo aleatorio no debe formar parte del análisis, sino que depende de una secuencia lógica de eventos. En este trabajo se pretende indicar únicamente algunos de los aspectos vinculantes que se deben tomar en cuenta en viviendas multifamiliares de desarrollo progresivo, basados en los lineamientos indicados en los procedimientos de análisis estático no lineales actuales.

Palabras clave: análisis por desempeño, progresividad, edificaciones multifamiliares, acero estructural, *pushover*

1. INTRODUCCIÓN

Según Cilento A. (1999):

La vivienda progresiva es una solución al problema habitacional que parte de la base de proporcionar a cada familia los requerimientos básicos esenciales y adecuados de alojamiento, concebido de tal manera que el usuario pueda, por sus propios medios y recursos (autoconstrucción, autogestión, ayuda mutua, contratación), ampliar la unidad inicial progresivamente...hasta alcanzar una vivienda estructural, salubre, confortable y estética según sus requerimientos y posibilidades. Se trata por tanto de proporcionar al beneficiario lo indispensable y asequible, según sus necesidades y recursos, para estimular la realización progresiva y la conclusión definitiva de su vivienda.

De acuerdo con Gelabert y González (2013):

La vivienda debería favorecer la adaptabilidad de sus espacios y funciones en el tiempo en correspondencia con la evolución dinámica natural de la familia, por disímiles factores: variabilidad en el número de sus miembros, composición variable del núcleo familiar, desarrollo tecnológico en ascenso, posición económica y social de la familia, entre las más comunes. Esto permitiría evitar la obsolescencia de las soluciones, garantizando su validez en el tiempo y la calidad de vida de sus moradores.

Lo anterior denota que el crecimiento progresivo de una edificación es algo flexible en gran medida, ya que de acuerdo con los requerimientos específicos de cada familia, existirán varias posibilidades: crecimiento en planta, en elevación, etc. Sin embargo, este desarrollo no debe ser una actividad improvisada, ya que depende su éxito en gran parte del acierto de las posibilidades que se hayan establecido antes de la construcción de la edificación. En la figura 1 se observa que la edificación tendrá un crecimiento progresivo principalmente en planta, lo cual se logra, en general, adicionando miembros estructurales (vigas, columnas, etc.) y componentes no estructurales (paredes, ventanas, puertas, etc.). Así, se han sumado metros cuadrados de uso a la edificación original. El crecimiento de la vivienda está condicionado, por tanto y como se comentó anteriormente, al crecimiento y a las necesidades particulares de cada familia.

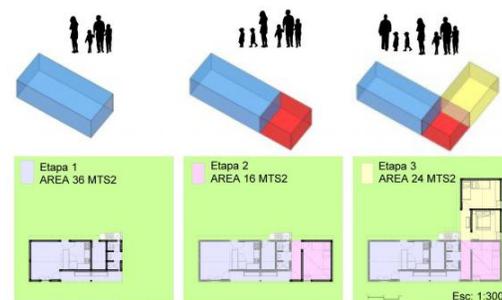


Figura 1: Crecimiento de las familias y de las viviendas.

(<http://www.a57.org/articulos/entrevista/nuestra-propuesta-se-plantea-como-un-sistema-modificable-y-ajustable-entrevista>)

Esto implica en forma evidente que paulatinamente y durante el crecimiento de la vivienda será necesaria la realización de modificaciones a su estructura, lógicas y pertinentes, que impliquen que la nueva vivienda (pudiendo ser aun parcial con posibilidades de continuar creciendo o definitiva) deberá seguirse caracterizando por tener, entre otros aspectos, adecuado comportamiento ante acciones gravitacionales y eventuales, como es el caso de un sismo. Es decir, que deberá seguir teniendo un adecuado comportamiento en régimen inelástico, que garantice, por ejemplo, mediante las deformaciones de sus miembros

estructurales, la adecuada disipación de energía inelástica. Esto incluye necesariamente la consideración del *daño estructural* en el análisis. Las deformaciones serán permanentes en lugares específicos de la edificación y será necesario el reemplazo de ciertos elementos o miembros estructurales para que la edificación siga cumpliendo a futuro con su función de manera segura para los ocupantes, y con suficiente resistencia para soportar sismos próximos con adecuada capacidad, aun de disipar energía por deformaciones inelásticas. Las viviendas, en todas sus etapas de construcción, deberán ser analizadas desde este punto de vista, lo cual implica, por supuesto, el análisis de cada posibilidad de crecimiento progresivo, como proyectos de edificaciones singulares, ya que al adicionar miembros estructurales y componentes no estructurales la edificación resultante es y se comportará de manera distinta a su(s) predecesora(s), tanto desde un punto de vista arquitectónico como estructural.

2. EL DISEÑO POR DESEMPEÑO DE EDIFICACIONES

Según Aguiar (2003) en relación con la meta fundamental del diseño por desempeño, indica que el objetivo primordial es conocer cuál será el desempeño o comportamiento que se espera tendrá una edificación ante un determinado evento sísmico, lo cual es lógicamente función del uso que tendrá la edificación. Con base en esto, son varias las propuestas indicadas en las normas de diseño sismorresistente, pero todas ellas convergen en que se deben alcanzar ciertos niveles de desempeño de las edificaciones construidas en zonas sísmicas, sin que lo empírico sea una variable a considerar, siendo el costo y la seguridad de sus ocupantes aspectos fundamentales (Espinoza, 2011). En la figura 2 se muestran los principales objetivos para los niveles y rangos de desempeño de una edificación cualquiera, construida en zonas sísmicas. Es evidente que mientras mejor es el desempeño sísmico de una edificación, menos costosas serán las pérdidas, y viceversa. Se busca en todo momento que la edificación alcance su mayor nivel de desempeño, y se espera que en relación con el daño estructural, en lapsos de tiempo relativamente cortos luego de un sismo, los ocupantes puedan volver a la edificación, y esta siga manteniendo un elevado nivel de seguridad luego de efectuadas las reparaciones a que hubiera lugar.

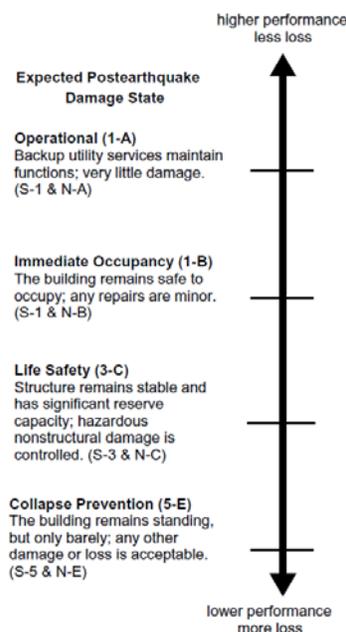


Figura 2: Objetivos para los niveles y rangos de desempeño en un edificio. [(ASCE 41-13 (2014)).

3. LA TÉCNICA DEL PUSHOVER

El análisis por desempeño sísmico de edificaciones emplea la técnica del *pushover* (empujón, según su traducción del inglés) o análisis estático no lineal, para analizar la sucesión en la ocurrencia de daño en la edificación, mediante la formación de mecanismos dúctiles (disipación de energía inelástica por deformación) por sobre los mecanismos frágiles (fallas por corte, etc.). La técnica del *pushover* (figura 3) consiste, de manera general, en aplicar una carga lateral monotónica creciente, la cual simula la acción sísmica y que genera un corte en la base (V), a una edificación, de acuerdo con valores previamente establecidos del desplazamiento lateral de la misma (Δ_{roof}) en el último nivel de la edificación (techo), valores que se espera pueda esta alcanzar durante un evento sísmico en su vida útil, e ir verificando y constatando que la disipación de energía inelástica, la cual se logra en general por la formación de rótulas plásticas, ocurre en locaciones convenientes de los miembros estructurales (extremos de las vigas, a una cierta distancia de la cara de las columnas, por ejemplo, en edificaciones aporticadas). Todo esto bajo el estudio o análisis de la jerarquización en el orden o secuencia de ocurrencia de dichas rótulas plástica, a medida que se aumentan los valores del desplazamiento lateral. Estas rótulas plásticas deberán irse generando de acuerdo con un orden previamente establecido y no de manera aleatoria, lo cual pudiera llevar a comportamientos erráticos y difíciles de predecir de la edificación, ante cargas laterales. De acuerdo con la figura 4, se observa la localización de las rótulas plásticas para un comportamiento sísmico considerado como “ideal”, en lo referente a la disipación de energía inelástica en edificaciones aporticadas. Como se aprecia, las rótulas plásticas están ubicadas en los extremos de las vigas y en la base de las columnas inferiores.

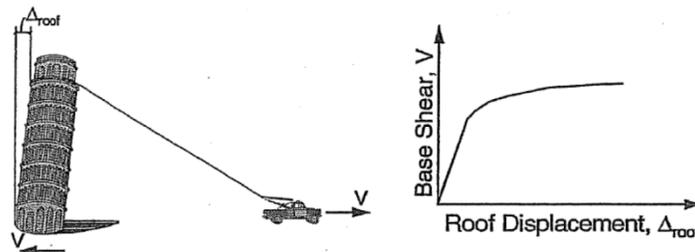


Figura 3: Basamento de la técnica del *pushover*. [ATC-40 (1996)]

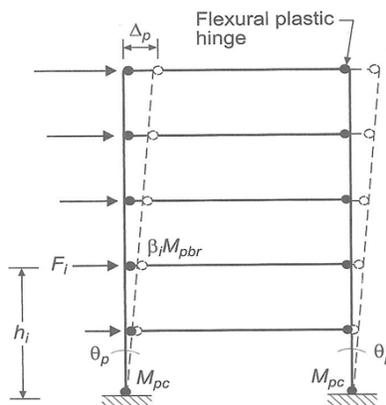


Figura 4: Localización de rótulas plásticas en comportamientos sismorresistentes ideales de edificios aporticados. (Goel y Chao, 2008).

Pese a que se considera este tipo de mecanismo de disipación de energía inelástica como ideal o *deseable*, es importante destacar que se puede presentar otro tipo de comportamientos, en los cuales la formación de rótulas plásticas pueda darse también en extremos de algunas columnas superiores, sin que ello implique necesariamente que la edificación esté en peligro de colapso. Estos comportamientos, siempre y cuando hayan sido adecuadamente analizados, implican miembros estructurales que tendrán capacidad suficiente para resistir solicitaciones adicionales provenientes de los miembros en donde se han formado articulaciones plásticas (redistribución de momentos en el comportamiento plástico).

Lo anterior resume lo que persigue el *pushover* como técnica para realizar análisis por desempeño de edificaciones: determinar la localización de las rótulas plásticas y analizar el progresivo incremento del nivel de daño; es decir, según D'Amico y Levy (2000), con cada formación de una rótula plástica se realiza un nuevo análisis incrementando la carga lateral, apareciendo por lo tanto nuevas articulaciones plásticas, y así sucesivamente, hasta que el sistema pase a ser un mecanismo (inestable). Como se miden desplazamientos *versus* fuerzas laterales aplicadas, se obtiene una curva que relaciona ambas variables. La relación que existe entre el desplazamiento lateral último (Δ_u) y el desplazamiento lateral en donde comienza la cedencia (Δ_y), indicará la ductilidad global de la estructura (μ). Por lo tanto, $\mu = \Delta_u/\Delta_y$. Resulta obvio que a mayores desplazamientos laterales últimos (Δ_u), mayor será la ductilidad alcanzada por el sistema, pero también a costa de un nivel de daño mayor al haber mayores deformaciones de los miembros estructurales. En análisis más rigurosos pudiera estudiarse la posibilidad de llevar a cabo un balance energético, ya que al daño de los miembros estructurales se asocia una energía disipada inelásticamente (E_y), y a mayor daño, por lo tanto, corresponderá un mayor valor de E_y . La incorporación de amortiguamiento al sistema pudiera permitir reducir el daño en los miembros estructurales al reducirse la energía que será disipada inelásticamente, ya que se estaría aumentando la energía por amortiguamiento (E_a), por ejemplo.

En general, es posible relacionar distintos niveles de desempeño para un componente estructural, el cual presenta rótulas plásticas, como se indicó anteriormente, mediante gráficos fuerza-desplazamiento lateral (figura 5). Cada uno de estos niveles de desempeño está relacionado con un índice de daño cada vez mayor a medida que crecen los desplazamientos laterales. Esto puede continuar hasta que el sistema se convierte en un mecanismo; la caída de los valores de fuerza en el gráfico así lo indican.

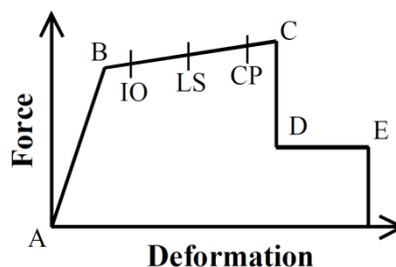


Figura 5: Gráfico fuerza vs. deformación de algún componente estructural. (Habibullah y Pyle, 1998).

Se observa cómo desde el punto A hasta el B, rango esencialmente de comportamiento elástico del miembro estructural, las deformaciones son proporcionales a la fuerza aplicada. En B comienza la cedencia y, por lo tanto, el rango inelástico y el daño estructural. El punto IO (ocupación inmediata), LS (seguridad de vida) y CP (prevención de colapso) indican distintos niveles de deformación que pueden considerarse como aceptables en términos de desempeño. A partir de C se aprecia la importante caída de resistencia, alcanzándose el

colapso total en el punto E. El punto IO representará el nivel en el cual la edificación continúa siendo segura para ser ocupada, manteniendo una gran resistencia y rigidez en comparación con la que tenía antes del evento. El punto LS toma en cuenta un daño estructural importante, pero se tiene una reserva de resistencia y rigidez para que el colapso estructural no ocurra, sin embargo, la edificación debe ser reforzada, y su ocupación inmediata no es generalmente posible y muchas veces es económicamente imposible de afrontar. Al final, el punto CP representará un nivel en el cual la rigidez y resistencia de la estructura han sido muy afectadas, teniendo en general la edificación aún resistencia para soportar cargas verticales, pero está frente a un posible colapso, con lo cual no se considera la reparación de la edificación ni hay garantía de seguridad para su reocupación (Espinoza, 2011). La figura 6 muestra un gráfico de envolvente cíclica, que envuelve el comportamiento de un componente sometido a una carga cíclica, y se aprecia el comienzo de la degradación del componente junto con la rigidez residual.

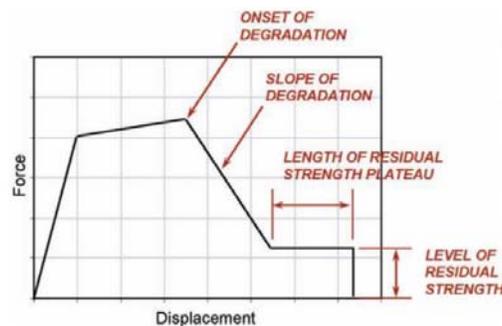


Figura 6: Contorno máximo de la capacidad cíclica. (Espinoza, 2011)

Finalmente, de la aplicación del método de *pushover* se obtendrá un gráfico de demanda-capacidad, en donde se aprecia un punto que interseca, tanto el gráfico de curva de capacidad del *pushover* con el espectro sísmico empleado (figura 7). De esto resultará un punto, denominado *punto de desempeño (performance point)*, el cual a su vez estará asociado con un valor de desplazamiento. Esto servirá para evaluar en definitiva la capacidad del sistema estructural y poder concluir, de una manera bastante aproximada, si la estructura tendrá un comportamiento inelástico adecuado para el sismo de diseño considerado. Variando condiciones particulares en el sistema estructural, se obtendrán valores distintos de los puntos de desempeño.

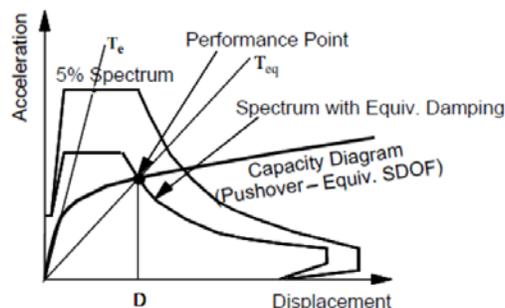


Figura 7: Representación del Método del Espectro de Capacidad (ATC-40). (Espinoza, 2011)

Es determinante y evidente que, para cada etapa del desarrollo progresivo de una edificación, es muy importante considerar realizar análisis por desempeño de las edificaciones, con las adiciones correspondientes (miembros y componentes no estructurales). Así, con cada ampliación se tendrá garantía de que las edificaciones resultantes tendrán un adecuado desempeño sísmico, asegurándose de esta manera la seguridad para los ocupantes de las mismas y que los daños se concentren en las zonas destinadas de los miembros estructurales específicos, bajo costos razonables de reparación y niveles elevados de seguridad para los ocupantes, de manera inmediata y en el largo plazo.

4. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL ANÁLISIS POR DESEMPEÑO DE ESTRUCTURAS CON CRECIMIENTO PROGRESIVO

Resulta particularmente obvio, luego de haberse visto que la adecuada disipación de energía inelástica (E_y) se lleva a cabo por medio de deformaciones controladas de los miembros estructurales y en ubicaciones particularmente convenientes, más allá de sus límites elásticos, que existirán varios aspectos a considerar en el crecimiento progresivo de edificaciones en relación con su desempeño ante acciones sísmicas. Muy importante es mencionar en este momento, que se debe mantener siempre un absoluto control de los procesos de análisis y construcción de las edificaciones, ya que cierta imprecisión o modificación de algún detalle estructural indicado en los planos del proyecto, pudiera conducir a comportamientos sísmicos erráticos y no evidenciados en los análisis estructurales previos de cada etapa de crecimiento progresivo. Por ello, la supervisión por personal capacitado es indispensable para garantizar el fiel cumplimiento de los logros que se desean alcanzar con la evaluación del desempeño de las edificaciones.

De acuerdo con Andrade (2004):

La capacidad de una estructura de soportar daños significativos permaneciendo estable se puede atribuir por lo general a su resistencia, ductilidad y redundancia. El daño severo o colapso de muchas estructuras durante terremotos importantes es, por lo general, consecuencia directa de la falla de un solo elemento o serie de elementos con ductilidad o resistencia insuficiente.

La resistencia se relaciona directamente con la capacidad para soportar cargas; contrario de la rigidez, la cual se asocia con las deformaciones de los diferentes miembros estructurales. Resulta obvio que estructuras demasiado flexibles tendrán niveles de deformaciones elevados, mientras que en las rígidas ocurre todo lo contrario. Sin embargo, un exceso de rigidez pudiera significar el dejar de favorecer al propósito de disipar energía inelástica de manera adecuada mediante el daño controlado de los miembros estructurales por deformación, por lo que no se debe caer en los límites extremos de flexibilidad ni rigidez. La flexibilidad excesiva inducirá daños importantes en componentes no estructurales.

Las edificaciones aporticadas de acero son de las configuraciones estructurales que mejor se adaptan al crecimiento progresivo. Entre algunos de los aspectos que se deben considerar cuando se lleva a cabo proyectos de edificaciones aporticadas en acero estructural, en lo referente al desempeño ante acciones sísmicas de las distintas posibilidades de crecimiento progresivo, se pueden mencionar los siguientes: ductilidad del acero estructural, adición de miembros estructurales (vigas y columnas) y la redistribución de momentos, incorporación de losas y su comportamiento como diafragma infinitamente rígido, conexiones entre los miembros estructurales, adición de irregularidades, principalmente.

4.1. Ductilidad del acero estructural

En general, el acero es un material ampliamente conocido por su comportamiento dúctil. Sin embargo, y de acuerdo con Núñez (2015), representa un error importante el considerar que esta característica del material puede trasladarse al sistema estructural de forma directa, por lo cual es necesario disponer de ductilidad al nivel de secciones y de miembros y elementos estructurales (vigas, columnas, conexiones entre los miembros, etc.). Obsérvese que, por ejemplo, en edificaciones hechas en concreto estructural, el acero de refuerzo le provee al conjunto concreto-acero un comportamiento dúctil muy satisfactorio, dependiendo de la disposición y cantidad del refuerzo colocado en obra, en particular.

De acuerdo con la Norma Covenin 1756-1:2001 *Edificaciones sismorresistentes*, es posible definir la ductilidad como la *capacidad que poseen los componentes de un sistema estructural de hacer incursiones alternantes en el dominio inelástico, sin pérdida apreciable en su capacidad resistente*. Esto implica, de acuerdo con lo indicado previamente, la aparición de daño en la estructura, ya que se disipa energía mediante deformaciones de los miembros estructurales. La ductilidad (μ_i) se obtiene, como ya se mencionó, dividiendo los valores máximos entre los cedentes, dependiendo de si lo que se mide, por ejemplo, es desplazamiento (Δ) de la estructura o curvatura (ϕ) de las secciones de los miembros estructurales, aunque también se pueden determinar ductilidades partiendo de otros parámetros. Cada una arrojará, en general, un valor diferente y, por lo tanto, elevados valores de una no necesariamente implica elevados valores de las otras. El valor menor condicionará la máxima ductilidad de la edificación. Obsérvese la figura 8, en donde se muestran distintos tipos de aceros y los valores de tensiones (σ) versus deformaciones (ϵ) en un ensayo con carga monotónica creciente, hasta que el espécimen ensayado alcanza su rotura o falla.

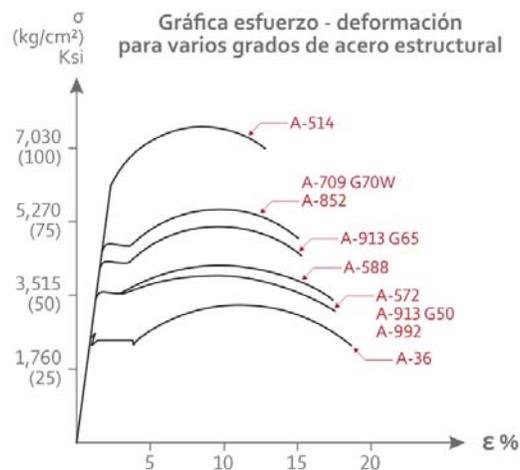


Figura 8: Gráfico tensión versus deformación de aceros estructurales. (<https://goo.gl/JWztBx>)

Aceros con mayores valores de su tensión cedente (F_y) presentan menor ductilidad, en comparación con los aceros con menores resistencias (Núñez, 2015). Así, por ejemplo, el acero A-36 tiene mayor ductilidad que el A-588, ya que alcanza mayor nivel de deformación última. Si lo que se desea es obtener edificaciones con adecuados comportamientos sismorresistentes, el empleo de materiales con menores valores de las tensiones cedentes, en general, resulta más adecuado.

En el crecimiento progresivo de edificaciones se debe tener especial cuidado con el tipo de acero empleado en los miembros estructurales que se adicionarán a la estructura para alcanzar el desarrollo de las siguientes etapas constructivas, ya que pudiera darse el caso, nada especial en el medio venezolano, que no exista disponibilidad de perfiles particulares para las vigas y columnas de la misma calidad de los existentes en la edificación en sus predecesoras etapas de desarrollo. Esto obviamente pudiera afectar el desempeño sísmico de la edificación en las siguientes etapas de crecimiento y ameritaría la necesidad de realizar un nuevo análisis por desempeño, considerando estas variaciones en el material.

4.2. Adición de miembros estructurales (vigas y columnas) y la redistribución de momentos

El crecimiento progresivo implica, como se indicó previamente, la adición de miembros estructurales (vigas, columnas, losas, etc.) y componentes no estructurales (mampostería, cerramientos en general, acabados, etc.), los cuales modificarán el comportamiento de la edificación para ajustarse a los nuevos parámetros de ampliación. Resulta evidente que la adición de miembros estructurales generará, entre otras cosas, la redistribución de momentos flectores y de acciones verticales (cargas provenientes de los componentes no estructurales). Para el caso de vigas, aquellas que en la primera etapa de la edificación tenían uno de sus extremos coincidiendo con la fachada, es posible que ahora tengan uno o varios tramos más unidos a este, los cuales han sido adicionados para las siguientes etapas constructivas. En cambio, algunas columnas pudieran ahora tener valores de cargas verticales mayores, con la generación de solicitaciones posiblemente también mayores. Esto hace necesario que en el análisis por desempeño de la nueva edificación, exista una redistribución de solicitaciones. Por lo tanto, pudiera darse el caso de un miembro que antes tenía una sección transversal suficientemente resistente como para soportar las solicitaciones debidas a todas las acciones consideradas en su análisis (verticales, laterales, etc.), y que en la siguiente etapa de crecimiento resulte inadecuada o con una capacidad estructural insuficiente. Esta consideración pudiera traer consigo que en la primera etapa constructiva aparezcan miembros con dimensiones visiblemente elevadas y que para esa etapa en particular pudieran resultar excesivas de acuerdo con las solicitaciones existentes, pero suficientes para las siguientes etapas. Bien sabido es, que en el caso de columnas, el aumento de las cargas axiales impacta de manera negativa la ductilidad de la misma.

Supóngase el caso indicado en la figura 9, correspondiente al sistema SIEMA-VIV del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), en el cual se indican dos etapas de crecimiento progresivo, en las que se han adicionado vigas, columnas, losas y componentes no estructurales. Es lógico que la vivienda en la etapa II dista mucho, en cuanto a su arquitectura y comportamiento estructural, de aquella de la etapa I, ya que la adición de miembros hacia los lados de los ejes 1 y 4 han permitido ahora obtener ampliaciones de 20 m² para cada apartamento original (50 y 60 m²), con lo cual han pasado a tener un área de 70 y 80 m², lo cual se materializa en la obtención de un cuarto y un baño adicionales a los existentes en la etapa I para cada tipo de apartamento, pasando por lo tanto a tener estos, tres habitaciones y dos baños. En este sistema la adición de miembros estructurales se logra mediante conexiones empernadas flexibles sin la inclusión de soldaduras en campo, más que aquellas necesarias para la fijación de elementos, tales como láminas de los soffits metálicos y componentes no estructurales. Aunque en este sistema en particular las conexiones son del tipo flexible, es de hacer notar que las columnas de los ejes 1 y 4 en la etapa I recibían una porción de carga inferior a la que tendrán en la etapa II.

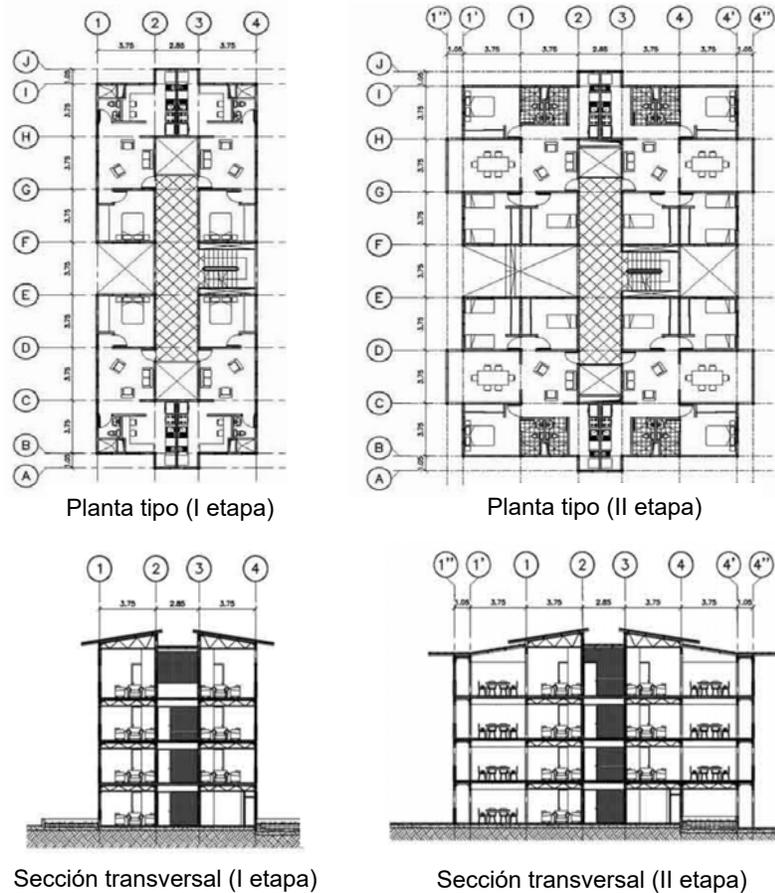


Figura 9: Plantas y secciones de la vivienda propuesta (Sistema SIEMA-VIV). (Hernández R., 2008)

La adición de miembros estructurales (vigas, columnas y losas) traerá consigo la modificación de la distribución de solicitaciones, sobre todo en aquellos en los que las conexiones entre las vigas y las columnas sean del tipo rígido o semirrígido, las cuales tienen una alta capacidad de resistir solicitaciones de flexión y corte, principalmente. Al cambiar las condiciones de columnas laterales a interiores, las vigas de la nueva etapa constructiva o de ampliación transmitirán solicitaciones a estas columnas, generando un aumento, por ejemplo, de la carga axial y una condición distinta en el nodo viga-columna original.

4.3. Incorporación de losas y su comportamiento como diafragma infinitamente rígido

Las fuerzas sísmicas se consideran en el análisis estructural como un conjunto de cargas aplicadas lateralmente en la edificación (método estático equivalente, por ejemplo), las cuales generarán cortes en las columnas y deformaciones laterales en la edificación. Con estas deformaciones laterales ocurrirán modificaciones de las tensiones en los miembros estructurales, ya que las solicitaciones debidas a la acción sísmica se adicionan a aquellas provenientes de las cargas verticales en la estructura (permanentes y variables). Por esto, son las losas las encargadas de transmitir estas fuerzas sísmicas a la estructura y distribuirla en los miembros, los cuales participarán en la resistencia global de la edificación según su resistencia particular. Con esto se evidencia que las losas deberán actuar como diafragmas infinitamente rígidos en su plano, lo cual significa, esencialmente, que deberán tener

espesores suficientes y carecer de excesivas discontinuidades (espacios vacíos) que afecten este tipo de comportamiento.

Al crecer una edificación para seguirse desarrollando, se adicionarán losas estructurales. Pero esta adición trae consigo la generación de juntas de construcción, las cuales, de no hacerse adecuadamente, pudieran interrumpir la acción de diafragma con rigidez infinita, comportándose como una sola unidad por cada nivel de la edificación, y convertirse, en cambio, en diafragmas independientes con rigidez infinita individual. Este aspecto debe ser tomado en cuenta durante la construcción de las siguientes etapas y disponer, convenientemente, de detalles que permitan el crecimiento progresivo de los diafragmas sin la afectación de su comportamiento como una sola unidad por cada nivel de la edificación. En la figura 10 se muestran algunos detalles de unión entre las láminas de acero en sofitos metálicos. Deben también proveerse detalles particulares para el vaciado de concreto y la unión del concreto nuevo con el existente.

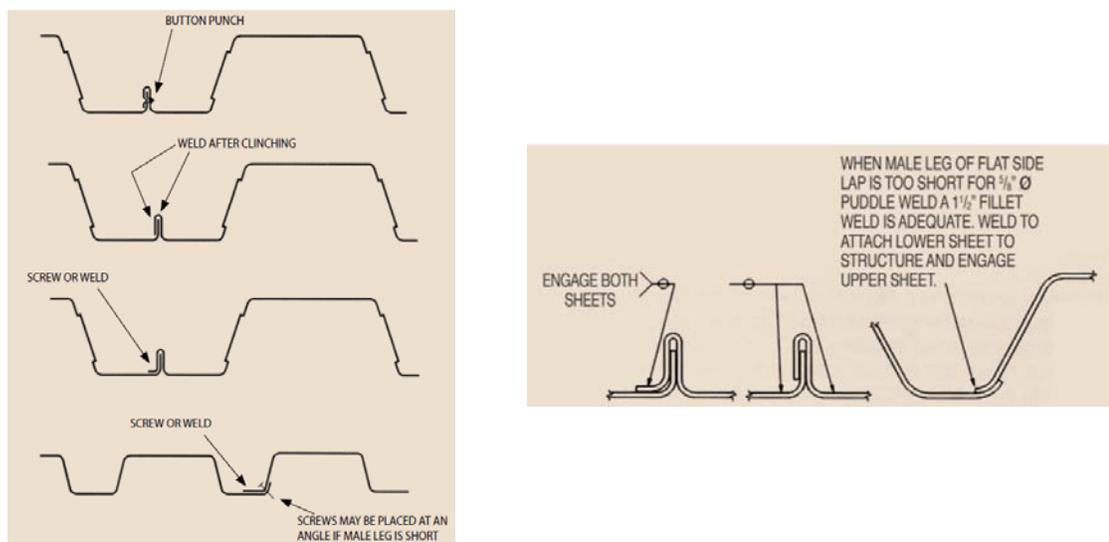


Figura 10: Formas correctas de unión para láminas de sofitos metálicos por medios mecánicos. (SDI Manual of Construction with Steel Deck, 2006)

4.4. Conexiones entre los miembros estructurales

En edificaciones de acero estructural las conexiones entre los miembros principales se convierten en uno de los aspectos a los cuales debe prestarse mayor atención. Las conexiones, en general, pueden ser de tres tipos: rígidas, semirrígidas y flexibles. Cada una de ellas proporcionará un diferente nivel de empotramiento en los extremos de los miembros que se encuentren unidos a ellas, siendo las rígidas las que tendrán un mayor nivel y las flexibles el menor, quedando las semirrígidas como intermedias entre ellas.

En la figura 11 se observa el gráfico momento *versus* rotación de unas conexiones de acero estructural, las cuales fueron sometidas a unos ensayos con carga lateral (P), lo cual permite medir las rotaciones existentes a medida que la carga va creciendo. Es evidente cómo mediante el ensayo es posible constatar lo indicado anteriormente.

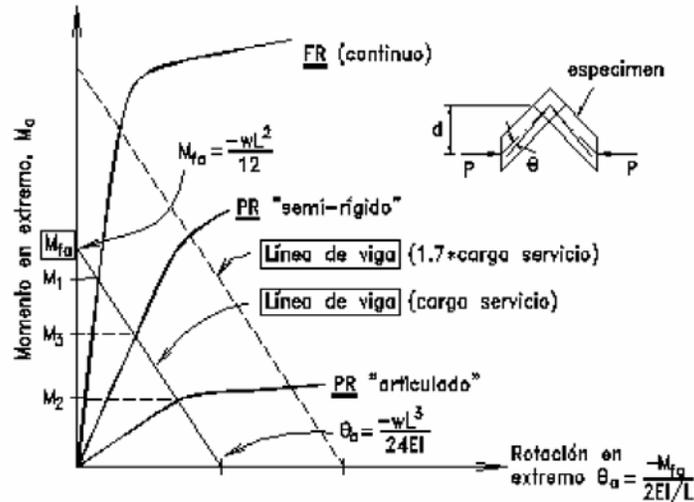


Figura 11: Gráfico momento *versus* rotación de distintos tipos de conexiones en acero. (Baglietto, 2007)

El tipo de conexión entre miembros estructurales es un aspecto entonces que presenta una importancia capital, ya que de allí será posible una adecuada distribución de tensiones, por ejemplo, que permitirán que la formación de rótulas plásticas se lleve a cabo en la ubicación de los miembros estructurales (vigas, en general) y de la manera deseada en el análisis inelástico de la estructura, lo cual lógicamente condicionará su adecuado desempeño sísmico. La nueva etapa de crecimiento tendrá adiciones de miembros que se conectarán con algunos de la estructura original, lo cual generará la condición explicada. Una conexión mal concebida pudiera generar un "desvío" de estas tensiones hacia otras localidades de la estructura, no destinadas a incursionar en el rango inelástico o, por ejemplo, no en un determinado momento del análisis. Por ello, esta "nueva" ubicación de deformaciones inelásticas, a medida que se avanza en el análisis por desempeño y la estructura se deforma más, pudiera incursionar en límites de desempeño elevados que pudieran inducir en casos extremos el colapso del sistema, situación peligrosa que debe evitarse.

4.5. Ubicación de rótulas plásticas y redistribución de momentos flectores en el análisis plástico

El análisis plástico de estructuras supone en todo momento que debe existir una redistribución de momentos flectores en los miembros estructurales, una vez que van ocurriendo las formaciones de rótulas plásticas en las ubicaciones establecidas para tal fin. De acuerdo con Fratelli (1967):

En las estructuras estáticamente indeterminadas o hiperestáticas, el proceso no es exactamente el mismo. Con la formación de la primera articulación plástica no se alcanza el límite de resistencia del sistema total debido a que el resto de la estructura, aun en régimen elástico, es capaz de cooperar para soportar un incremento de las cargas aplicadas. Este incremento de las cargas produce la formación de una segunda articulación plástica en otra sección de la estructura, que resulta la más solicitada elásticamente y para la cual el momento flector aplicado adopta también su valor límite... Este proceso es posible únicamente cuando la ductilidad del material es grande y permite que las deflexiones en la primera de las articulaciones formadas no sobrepasen ciertos valores

admisibles, mientras en el resto del sistema se van localizando sucesivamente las restantes rótulas de fluencia. Si esto no sucede, se producen colapsos parciales por inestabilidad local o rotura localizada del material.

Es importante destacar que no se debe confundir *fluencia* con *cedencia*. (Nota del autor.)

De acuerdo con lo explicado previamente, es necesario establecer las zonas en donde ocurrirá la disipación de energía inelástica mediante daño y sus posteriores consecuencias (al nivel de reparaciones posteriores). En el caso de las vigas, la figura 12 muestra claramente la ubicación deseada para que se formen rótulas plásticas, a una distancia suficiente de la cara de los miembros de apoyo que, en general, son columnas o miembros solicitados a flexocompresión. Se destaca, como se explicó con anterioridad, que adicionalmente a este mecanismo plástico en las vigas es posible encontrar columnas en las cuales se han formado rótulas plásticas en alguno de sus extremos, lo cual no necesariamente inducirá un mecanismo en la edificación.

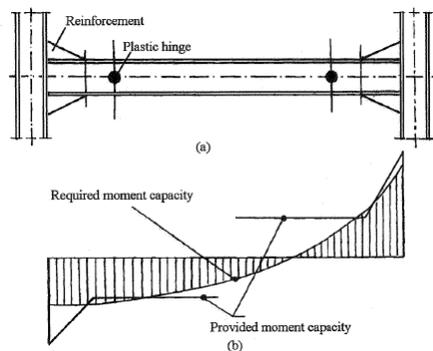


Figura 12: Ubicación de rótulas plásticas en vigas. (Gioncu y Mazzolani, 2002)

Se aprecia cómo los extremos de la viga presentan conexiones rigidizadas por planchas verticales (rigidizadores), tanto arriba como debajo de la conexión, lo cual genera zonas potencialmente más débiles a una cierta distancia de la cara de la columna, por lo que se espera que las rótulas plásticas se generen a una cierta distancia después de los rigidizadores. Esto puede lograrse, también, con una conexión como la indicada en la figura 13, en donde se ha debilitado la viga en sus dos extremos (alas) para lograr un efecto similar al indicado.

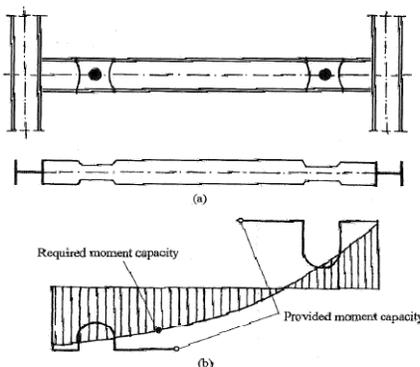


Figura 13: Ubicación de rótulas plásticas en vigas con alas destajadas. (Gioncu y Mazzolani, 2002)

4.6. Adición de irregularidades

Con el crecimiento progresivo de una edificación cualquiera, es muy posible incorporar algún tipo de irregularidad, bien sea que el desarrollo progresivo sea en planta o elevación. Por ello, el desempeño de la nueva etapa de crecimiento pudiera estar siendo afectado por algún tipo de situación que genere concentración de tensiones en ubicaciones no deseadas para garantizar que la nueva estructura disipará inelásticamente energía, de acuerdo con los mecanismos provistos en su diseño por desempeño. Se debe recordar en todo momento que adicionar miembros estructurales a una edificación existente alterará su comportamiento ante acciones sísmicas y que las irregularidades generan condiciones particulares en las edificaciones, las cuales siempre deben tomarse en cuenta.

5. CONCLUSIONES

Se han mencionado algunos aspectos que deben tomarse en consideración cuando se planifican y proyectan edificaciones aporticadas de baja altura de acero estructural con crecimiento progresivo. El establecimiento del desempeño de una edificación estará condicionado a la secuencia en la cual se vayan formando las zonas de disipación de energía inelástica en la estructura, o secuencia de formación de rótulas plásticas o mecanismos dúctiles. Esta secuencia obedece a parámetros de comportamiento estructural deseado y cualquier variación en los aspectos constructivos o calidad de ejecución de la obra pudiera alterar de cierta forma el desempeño de la edificación. Por ello, el crecimiento progresivo involucra la adición de miembros a una estructura existente y cada etapa de crecimiento, por lo tanto, presentará de por sí un comportamiento sísmico particular. Esta adición de miembros incluye a las losas estructurales, que en acero serán ejecutadas, por ejemplo, mediante láminas de acero y concreto en su parte superior (sofitos metálicos), y su continuidad será un aspecto muy importante en la transmisión de las cargas sísmicas laterales entre los miembros estructurales. Las conexiones entre las vigas y columnas son un punto crucial en el desempeño de edificaciones en acero estructural ante acciones sísmicas, por lo que su correcto análisis y construcción son uno de los aspectos en los que debe prestarse mayor atención. En conclusión, los aspectos indicados en este documento son solo algunos de los que pudieran presentarse y que, en mayor o menor medida, pudieran causar que edificaciones aporticadas de baja altura con crecimiento progresivo tengan desempeños sísmicos variables.

6. REFERENCIAS

- Aguiar, R. (2003). *Análisis sísmico por desempeño. Valle de los Chillos*. Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército.
- American Society of Civil Engineers. (2014). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings ASCE 41-13*. Virginia.
- Andrade, I. (2004). Control de la deriva en las normas de diseño sismorresistente. Trabajo Final de Grado para optar al título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Applied Technology Council. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings ATC-40*. Volume I. California.
- Baglietto, L. (2007). Conexiones en estructuras de acero. Conferencia Internacional en Ingeniería Sísmica, Lima.

Cilento, A. (1999). *Cambio de paradigma del hábitat*. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC)- Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH).

Comisión Venezolana de Normas Industriales (Covenin). (2001). Edificaciones sismorresistentes 1756:2001-1. Caracas.

D'Amico, F. y Levy, D. (2000). Método del *pushover*. Optimización configuracional de estructuras aporticadas. Trabajo Final de Grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Metropolitana, Caracas.

Espinoza, V.T. (2011). *Ingeniería sísmica basada en desempeño*. Perú: Comunidad para la Ingeniería Civil.

Fratelli, G. (1967). *Cálculo plástico. Análisis y diseño límite de sistemas estructurales planos*. Buenos Aires, (s/e).

Gelabert, D. y González, D. (2013). Progresividad y flexibilidad en la vivienda. Enfoques teóricos. *Arquitectura y Urbanismo*, vol. 34, n° 1, abril. Extraído el 12 de febrero de 2017 de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376834402003>

Gioncu, V. y Mazzolani, F. (2002). *Ductility of seismic resistant steel structures*. New York: Spon Press.

Goel, S.C. y Chao, S. (2008). *Performance based plastic design. Earthquake-resistant steel structures*. Illinois: International Code Council (ICC).

Habibullah, A. y Pyle, S. (1998). Practical three dimensional nonlinear static pushover analysis. Extraído el 07 de marzo de 2008 en: http://computersandengineering.de/downloads/technical_papers/CSI/PushoverPaper.pdf

Hernández R., B. (2008). Viviendas multifamiliares de desarrollo progresivo. *Memorias de la Semana Internacional de Investigación*. Caracas: Ediciones de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela.

Núñez, L. (2015). Estudio de conexiones a momento empleando vigas de alma abierta y columnas tubulares en sistemas estructurales de pórticos a momento en estructuras de acero ante cargas sísmicas. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

Steel Deck Institute. (SDI). (2006). *Manual of Construction with Steel Deck*. Illinois.

VIVIENDAS MULTIFAMILIARES DE DESARROLLO PROGRESIVO. UN EJEMPLO DE VIVIENDA FLEXIBLE

Beverly Hernández R.

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), FAU.UCV.
beverlyhernandez@gmail.com; bhernandezfau@gmail.com

RESUMEN

La dinámica familiar tiene como característica su constante cambio en el tiempo debido a los diferentes aspectos en ella misma como del contexto que la influye, por ende no es de extrañar que aumente o disminuya el número de miembros de una familia que vive bajo un mismo techo. Es aquí donde la vivienda muchas veces exige flexibilidad en sus espacios para adaptarse a estos cambios, de manera que pueda perdurar en el tiempo y aumentar su vida útil. Un ejemplo de vivienda flexible es la vivienda progresiva, la cual se va construyendo y mejorando a la velocidad que determinen los cambios en el núcleo familiar. En Venezuela, al igual que en muchos países de Latinoamérica, e incluso Europa, se ha observado cómo este fenómeno de transformación de espacios residenciales hacia una construcción progresiva ocurre, tanto en viviendas unifamiliares o multifamiliares de bajo costo como en aquellas para habitantes de ingresos medios, a pesar de ser distintas las motivaciones en cada uno de los casos. Para este trabajo nos enfocaremos en analizar las características de la vivienda flexible y su relación con la vivienda multifamiliar de desarrollo progresivo, en el caso de las familias de ingresos medios que viven en entornos urbanos, como un caso de transformación físico-espacial de la vivienda, lo cual también responde a un motivo sustentable de reducción de recursos y energía, evitando una obsolescencia de la edificación. De tal manera, la progresividad en edificaciones residenciales pudiera ser planteada como una herramienta para la producción de viviendas flexibles, adaptadas a las necesidades de espacio de sus habitantes a lo largo de la vida útil de la edificación.

Palabras clave: viviendas flexibles, desarrollo progresivo, viviendas multifamiliares, transformaciones espaciales.

1. CAMBIOS EN LA DINÁMICA FAMILIAR

Según Gallego (2012), la dinámica familiar se rige por una serie de normas, jerarquías y roles que permiten el funcionamiento de cualquier familia. En este sentido, esta dinámica varía constantemente en relación con los cambios internos que se producen naturalmente tanto dentro del núcleo familiar como de aspectos externos referidos al contexto.

Como bien lo señala Saúl Franco, en Gallego (2012), la organización de las familias, así como su dinámica, se ha modificado también en el tiempo, y estos cambios obedecen al período histórico y social de cada época. Particularmente en Venezuela hemos pasado por varias etapas de cambios en los tipos de familias. En el caso que nos atañe, destacaremos cómo actualmente en el tipo de familia nuclear de ingresos medios, con acceso a bienes y servicios (factor determinante en los logros de este tipo de familias) tiene en algunos casos la motivación de transformar el espacio donde vive.

Uno de los cambios frecuentes que se observa en la familia venezolana es el aumento y/o disminución de miembros de una familia que reside en una vivienda a lo largo de un período de tiempo considerable, o por la duración del núcleo familiar. Estos nuevos habitantes llegan generalmente a espacios predeterminados y se van moviendo dentro de él, ajustándose a las limitaciones físicas de cada vivienda. “Una vivienda es el resultado de un proceso en que el usuario toma decisiones” (Habraken et al., 2000).

Bajo esta idea, existe la posibilidad de adaptación del espacio físico ante estos cambios, por lo que la vivienda debería entonces ser flexible para albergar diferentes situaciones del núcleo familiar en diferentes períodos de tiempo.

Más adelante veremos a qué se denomina vivienda flexible y bajo qué concepto podemos modificar dicha vivienda y cómo algunos han planteado su diseño.

2. VIVIENDA FLEXIBLE

Cuando se habla de flexibilidad se entiende como una posibilidad de cambio, de adaptación sin mayores inconvenientes, de variación o hasta transformación, pero cuando llevamos este concepto a la vivienda se hace necesario definir esa cualidad un poco más. Galabert y González (2013) nos presentan la flexibilidad “... como una potencialidad que permite desarrollar la evolución de la vivienda en el tiempo, al favorecer el cambio y la transformación durante su vida útil”. En este sentido, se puede relacionar esta flexibilidad con el objetivo común de la optimización de los espacios de una vivienda, capaces de adaptarse o adecuarse a sus habitantes y a los cambios que presente la dinámica familiar en un tiempo determinado.

Este concepto busca en todo caso el manejo de los espacios en función de su uso, en un momento determinado, sin la rigidez de una obra completamente terminada, con espacios determinados solo para un único uso, que no acepta cambios ni admite la interpretación personalizada de sus habitantes a lo largo del tiempo.

Una vivienda flexible se concibe en este caso como aquella que se transforma en el tiempo según las necesidades de quien la habita, “...como un objeto dinámico, que contiene y combina una pluralidad de usos, personas y actividades” (Galabert y González, 2013).

Sin embargo, Till y Schneider (2005) incluyen en este concepto de flexibilidad la posibilidad de elegir diferentes diseños de vivienda, al tiempo que se incorporan nuevas tecnologías e incluso la capacidad de cambiar completamente el uso del edificio de vivienda a otra cosa.

En su trabajo se plantea uno de los múltiples métodos para lograr flexibilidad en la vivienda, como lo es el diseño determinado a través de sistemas o elementos “duros” (*hard*) y el diseño indeterminado a través de sistemas o elementos “suaves” (*soft*). Los primeros conllevan la idea de planificar o predeterminar cómo se pueden utilizar los espacios en el tiempo, por supuesto, supeditado a la intervención del diseñador o arquitecto, mientras que con los segundos la planificación de esos espacios es más relajada, menos controlada, al igual que el uso de la tecnología, dejándole más responsabilidad del cambio al habitante a través de su participación e interpretación del espacio.

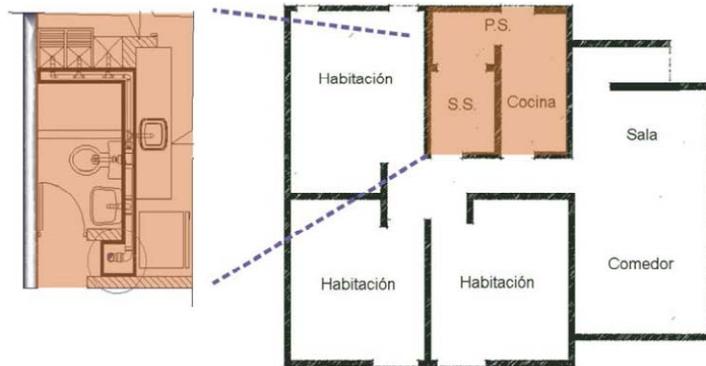


Imagen 1: Flexibilidad tecnológica a partir del uso de un núcleo húmedo con conducto registrable para las instalaciones hidrosanitarias. (Galabert y González, 2013)

El diseño determinado e indeterminado de Till y Schneider no escapa del uso de la tecnología para lograrlo, convirtiéndose en un aspecto indisoluble, por lo cual hace la misma distinción entre tecnología dura y tecnología suave en los aspectos estructurales, materiales, componentes constructivos, entre otros, que permiten llevar a cabo cada uno de los tipos de diseños planteados.

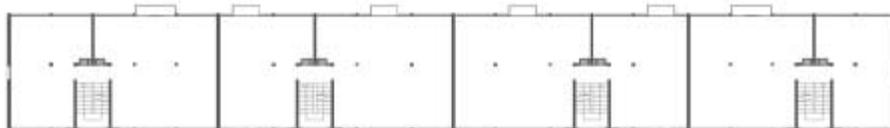


Imagen 2: Planta típica de Weissenhofsiedlung, Stuttgart (1927), diseñada por Mies van der Rohe. (Till y Schneider, 2005)

Por su parte, Habraken planteaba ya desde 1965 otro método de diseño para lo que denominó “viviendas adaptables”: el *diseño de soportes*, basado en la coordinación entre “unidades separables” y “soportes”. En este método incluía la concepción de la toma de decisiones por parte del habitante y también de la comunidad, por lo cual separaba las áreas en las que cada uno estaría en capacidad de modificar. Por ello, las unidades separables serían aquellas en las que los habitantes de las viviendas podrían tomar decisiones sobre el equipamiento, los espacios y su uso en sí, mientras que los “soportes” serían aquellos en donde la comunidad podría decidir. La estructura, por ejemplo, sería el soporte, pero solo lo sería en el momento que estuviera planificada para recibir unidades separables flexibles.

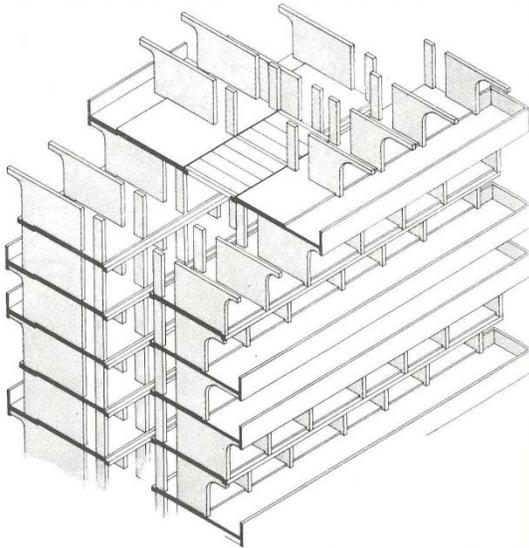


Imagen 3: Sistema de soportes gemelos. (Habraken, 2000)



Imagen 4: Proyecto Dominó 21. Madrid (2004)
<https://goo.gl/F3mn5D>

En ambos casos se mantienen ciertos elementos físicos en las viviendas, que pudieran ser modificados mientras que otros no tanto, dependiendo de su función, uso, ubicación y hasta de quien esté en capacidad de modificarlo.

Ahora bien, a pesar del evidente beneficio de una vivienda flexible, especialmente por su adaptabilidad, es conveniente destacar otra razón más cercana a los temas actuales como lo es la sostenibilidad.

Cuando se plantean edificaciones y en este caso residenciales con la capacidad de adaptarse a los cambios a los que se ve expuesta en el tiempo, es innegable que es una característica deseable que el edificio se adapte y se renueve, tomando en cuenta la dinámica de sus habitantes, sus relaciones como individuos y como grupo, el uso de los materiales, el diseño de sus componentes y el manejo de las uniones, entre otros. Estos tres últimos factores son los tomados en cuenta en la corriente *design for disassembly* o como mejor lo conocemos: deconstrucción, la cual propone desarmar antes que demoler.

Entender el ciclo de vida de las edificaciones y planificarlas, diseñarlas, construir las, mantenerlas y hasta deconstruir las y reciclarlas, podría considerarse un aporte al medio ambiente en cuanto al consumo de recursos y de energía consumida e incorporada. De esta manera, el concepto de renovar una edificación a través de la adaptabilidad de sus espacios según la necesidad de sus habitantes, podría garantizar en gran medida el aumento de su vida útil por la conservación del patrimonio construido de una ciudad.

3. VIVIENDA PROGRESIVA

Dentro del concepto general de vivienda flexible que hemos visto, la vivienda progresiva encaja perfectamente, pues como veremos, esta se ha concebido para adaptarse a ciertas situaciones diferentes a su etapa original; en palabras de Cilento (1999), "...es aquella que se construye mientras se consume".

Cilento considera la vivienda progresiva como una solución a la construcción de viviendas completas (en términos de espacios e instalaciones mínimas) que tradicionalmente se construyen y que presenta la incapacidad de adaptarse a las necesidades de las familias que

las habitan. Su enfoque está dirigido a plantear viviendas que puedan crecer en tamaño y mejorar en calidad, aprovechando al máximo la inversión inicial.

Basado en el concepto de la lógica de precariedad, la vivienda progresiva ha sido planteada en su mayoría para familias de bajos ingresos económicos, pues se construye solo lo que se va a utilizar inmediatamente, sin dejar espacios sin uso.

Barroeta, por su parte, define un doble proceso en la progresividad: el crecimiento y la consolidación, siendo la primera aquella en donde se amplían los espacios del núcleo básico de la vivienda, mientras que la segunda se refiere al "...mejoramiento en cuanto a la calidad de terminación y servicios realizados a la vivienda" (Barroeta, 1999).

La progresividad se refiere entonces a un proceso gradual, relacionado con el progreso, lo que implica perfeccionamiento, avance. En la construcción podemos decir que la progresividad se refiere al mejoramiento de los espacios habitables a través de la ampliación, o construcción de nuevos espacios o a la consolidación de los espacios existentes a través del mejoramiento de sus condiciones y calidad de los mismos.

Este concepto se redefine en términos actuales y sustentables ya no desde la lógica de la precariedad como una necesidad netamente económica, sino que responde también a una dinámica social y a la protección ambiental, dada la optimización del uso de recursos, en donde además se busca aumentar la vida útil de la edificación, evitando su obsolescencia a través de renovaciones, cambios, adaptaciones y mejoramientos que le permitan mantenerse actualizada en el tiempo. Esto solo puede lograrse con una edificación flexible, que pueda adaptarse a diferentes situaciones, algunas determinadas y otras indeterminadas a las que estará expuesta.

3.1. Tipos de progresividad

Como ya vimos, una vivienda progresiva es una vivienda flexible, y se puede lograr de diferentes maneras.

Dependiendo del enfoque, podemos diferenciar varios tipos de progresividad, sin embargo, coinciden en los aspectos generales de etapas iniciales de la edificación, diferentes a las etapas finales o en desarrollo para aquellos que consideran que la progresividad es un constante proceso de transformación.

No obstante, podemos observar que existen coincidencias en cuanto a los términos generales de generación de espacios adicionales en la vivienda. En todo caso, se habla de una etapa inicial que bien puede estar planteada bajo un diseño determinado y duro para estructura y áreas de servicios básicos, e indeterminado y suave para el resto de los espacios, considerando la indeterminación no como una ausencia de diseño completamente abierto.

La primera etapa puede estar dada desde un sistema de soporte o desde una protovivienda.¹ En una segunda etapa pueden permanecer ambos tipos de diseño y sus elementos duros y blandos y aumentar espacios hacia el exterior o hacia el interior, consolidando la primera etapa.

La mayoría de los autores coincide en clasificar la progresividad en dos grandes grupos, según su forma de crecimiento: progresividad hacia afuera y progresividad interna o hacia adentro.

¹ Protovivienda: Concepto que plantea Cilento (1999) para definir una vivienda progresiva en su etapa básica.



Imagen 5: Clasificación general de las viviendas progresivas. (Galabert y González, 2013)

Sin embargo, existe otro tipo de clasificación (Galabert y González, 2013) basado en las etapas de construcción, en las cuales podemos encontrar (véase imagen 6):

- Tipo semilla: es un núcleo básico, el cual Cilento llama “protovivienda”.
- Tipo cáscara: es aquella vivienda en donde se construye la parte exterior de la edificación y luego se va “rellenando” internamente.
- Tipo soporte: es cuando se construye la estructura y las instalaciones básicas y posteriormente se van completando los espacios habitables. Es el caso planteado por Habraken.
- Tipo mejorable: es cuando a la vivienda se mejora en cuanto a los materiales, para conseguir mejores condiciones. En esta clasificación algunos autores coinciden con la etapa de consolidación de la vivienda progresiva.

Estas dos autoras también manejan una clasificación de la vivienda desde el punto de vista de su flexibilidad uso o diseño (véase imagen 6), en:

- Vivienda de espacio libre: sin divisiones espaciales internamente. Un solo espacio único, a excepción de núcleos de servicios.
- Vivienda de recintos neutros: se compone de espacios fijos con posibilidad de intercambio de usos.
- Vivienda de espacio variable: contiene mayor cantidad de componentes fijos pero permite la integración de varios espacios. Generalmente se utilizan componentes móviles para divisiones interiores y mobiliario.
- Vivienda crecedera: más relacionada con la idea de progresividad, pues es la que se expande o crece, horizontal o verticalmente, más allá de la etapa inicial.

Oteiza et al. (1989) hace una clasificación en su estudio realizado en la ciudad de Maracaibo, en viviendas unifamiliares e informales, en donde se determinaron tres tipos de vivienda progresiva, según el estado de consolidación de la vivienda, basados solo en los aspectos físicos y constructivos. Los tipos de vivienda son los siguientes:

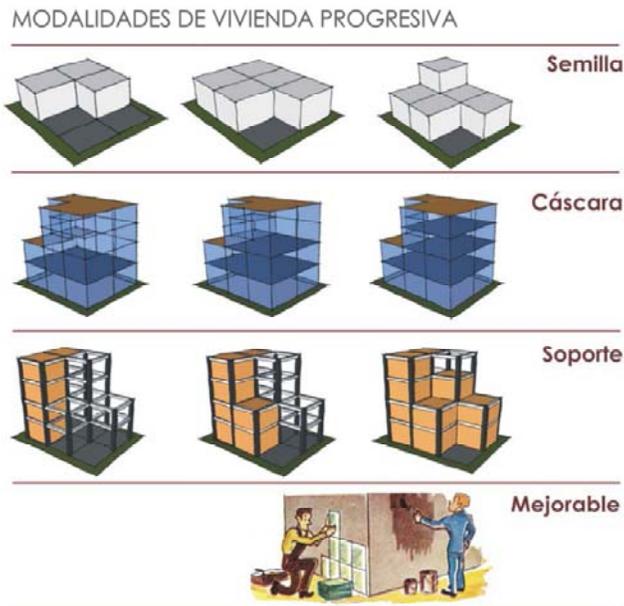


Imagen 6: Modalidades de progresividad. (Galabert y González, 2013)

- Vivienda en etapa formativa: caracterizada por la utilización de materiales de desechos, sin acabados.
- Vivienda en etapa de desarrollo: etapa posterior a la formativa. Combinación de sistemas constructivos y materiales transitorios.
- Vivienda en etapa de consolidación: etapa anterior a la terminada. Puede tener áreas terminadas y otras en desarrollo.
- Vivienda terminada: utilización de materiales duraderos, con acabados.

A pesar de que el trabajo de Oteiza versa sobre viviendas unifamiliares e informales, el concepto de las etapas de formación, desarrollo y consolidación, podría extrapolarse a otros tipos de viviendas con otras características.

Como se puede observar, existen distintos tipos de clasificación de la progresividad, según en el aspecto que nos concentremos, según las etapas de construcción o de transformación, por la forma en cómo se produce o se concibe y adicionalmente pudiéramos incluir si se planifica o no. En cualquier caso, el análisis de las viviendas progresivas debe tomar en cuenta estos y otros aspectos más como, por ejemplo, el ámbito en donde se desarrollan, quién las promueve, financia y construye, si la iniciativa es individual o colectiva y los actores que intervienen.

Así pues, el objeto de estudio se plantea en la vivienda progresiva y cómo puede ser considerada una vivienda flexible, ya que permite los cambios en sus espacios, cuando en la motivación del habitante prevalece la necesidad de espacio por un cambio en su dinámica familiar, especialmente aumento de los miembros que conforman la familia, en un estrato social de ingresos medios en la ciudad de Caracas.

4. EDIFICIOS MULTIFAMILIARES

Los edificios residenciales o viviendas multifamiliares se refieren a la agrupación de unidades de viviendas en vertical, los cuales podemos clasificar según su altura y densidad, dejando a un lado por los momentos el tipo de gestión para su construcción, mantenimiento o hasta su tipo de ocupación.

Las viviendas de mediana y baja altura suelen salir beneficiadas frente aquellas de mayor altura y densidad, entre otras cosas, por los costos asociados al mantenimiento de la edificación y sus servicios, y por las relaciones sociales entre ellos, especialmente aquellas asociadas a la alta cantidad de habitantes.

Las edificaciones plurifamiliares, por su parte, han sido explicadas por Cilento (1999, 2015) como aquellas edificaciones que agrupan unidades de viviendas en vertical y horizontal, con densidades medias-altas pero con baja altura. Este tipo de viviendas está en aumento, al menos dentro de la preferencia de algunos arquitectos y planificadores, ya que resuelve el problema de la alta densidad de habitantes en un área concentrada, pero con costos más bajos de mantenimiento que una edificación de gran altura.

Las edificaciones multifamiliares y plurifamiliares se asocian a un entorno urbano, principalmente por el aprovechamiento del terreno, el cual suele ser escaso en zonas urbanas. Esta característica le confiere una importancia a este tipo de edificación, pues más allá de haber sido planificado o no, son obras con vocación de generar ciudad, y su descontrol puede contribuir a la vulnerabilidad urbana, entre otras cosas.

Vivir en propiedad horizontal requiere de un mínimo de orden legal para contribuir con el tema de la convivencia. Si lo único que conocen los habitantes de estas edificaciones multifamiliares (sin condominios constituidos) es la aparición de la ley del más fuerte, se corre el riesgo de transgredir el entorno a discrecionalidad (Velasco Di Prisco, 2009, p. 2).

La construcción de edificaciones multifamiliares o plurifamiliares debe tener la participación de profesionales del área, para garantizar el control en los aspectos de vital importancia como la estructura y los servicios, ya que hablamos de construcciones de altura, las cuales conllevan un mayor riesgo frente a amenazas naturales como el sismo (a diferencia de una vivienda unifamiliar de uno o dos pisos) que podría acarrear un posible colapso y un riesgo de una mayor cantidad de personas.

Ahora bien, cabe preguntar a estas alturas: ¿Los cambios en la dinámica familiar de los que se habló anteriormente, sólo se producen en habitantes de viviendas unifamiliares o en familias de bajos recursos? ¿Acaso los habitantes de edificaciones multifamiliares no requieren de cambios en sus espacios?

Ante estas y otras interrogantes, muchos han dedicado su tiempo de estudio, por lo cual atenderemos los asuntos más destacables.

Si unimos todas estas características de los edificios residenciales, además con la posibilidad de desarrollo progresivo, el resultado será una edificación que requerirá mayor atención, desde su planificación, diseño, construcción, seguimiento, mantenimiento y gestión.

Hasta ahora se ha estudiado, aunque poco, la posibilidad de crecimiento progresivo en edificaciones multifamiliares, bajo dos grandes vertientes, aquellas en donde se concibe la progresividad desde el proyecto y la intervención del diseñador es determinante y en mayor proporción a la del habitante, y aquellas en donde a pesar de que la progresividad no ha sido

planificada, los habitantes la llevan a cabo algunas veces sin un patrón lógico y hasta sin reglas establecidas.

Estas situaciones suelen relacionarse inevitablemente con la figura que lleva a cabo el plan inicial de construcción, quién promueve y quién decide si se permite o no la progresividad y cómo se lleva a cabo y quién le da seguimiento técnico para garantizar una menor vulnerabilidad de las etapas posteriores a la inicial. Hasta ahora se ha centrado el estudio de estas situaciones en edificaciones construidas con la participación del Estado y para familias de bajos ingresos económicos que, como bien sabemos, es muy diferente en contraste con edificaciones construidas con capital privado para familias de ingresos medios o altos.

Y es de suponer que son aquellas familias de bajos ingresos quienes ante la imposibilidad de costear otra vivienda en el momento que se produce el aumento de los miembros de sus familias, opten por el crecimiento progresivo de sus viviendas, pues de alguna manera ahorran en insumos, puesto que la construcción nueva es una fracción dependiente de la construcción original, compartiendo cerramientos y servicios. Sin embargo, como vimos al principio, los cambios en la dinámica familiar no son exclusivos de familias de bajos ingresos, y muchas veces el nivel de ingreso no es el único factor que determina que una familia permanezca unida ante estos cambios y se decida por la progresividad y/o aumento de espacios de sus viviendas.

Si bien en sectores populares es donde abundan los casos de vivienda progresiva, con o sin control, en viviendas de clase media,² también se ha observado que sucede esta situación, de ampliación de espacios hacia el exterior de la edificación o construcción interna (mezaninas, nuevas habitaciones o baños) sin previsión, y en los casos contrarios, apartamentos concebidos como un solo gran espacio, con los servicios básicos como baño y cocina, en donde la progresividad es interna, de consolidación o mejoramiento de las condiciones. Estas etapas posteriores de construcción casi siempre están financiadas y gestionadas por el propietario de la unidad de vivienda o apartamento, el que decide hacer lo que desea, lo que necesita o lo que puede.

Para este caso particular, Barroeta presenta varios tipos de crecimiento progresivo en edificaciones multifamiliares de desarrollo progresivo, las cuales presentamos a continuación:

- Edificación multifamiliar con crecimiento hacia el interior (véase imagen 7).
- Edificación multifamiliar con crecimiento de las viviendas por medio de balcones (véanse imágenes 8 y 9).
- Edificación multifamiliar con crecimiento interno utilizando la losa de piso (véase imagen 10).
- Edificación multifamiliar con crecimiento sobre terrazas y terreno aledaño a la edificación (véase imagen 11).
- Edificación multifamiliar de tres niveles con crecimiento de sus viviendas utilizando el terreno aledaño a la edificación (1^{ro} y 2^{do} nivel) y la cubierta para el tercer nivel (véase imagen 12).

² Clase media: Las familias de clase media son aquellas cuyos ingresos están en la parte media de la distribución del ingreso nacional (Pressman, 2011).

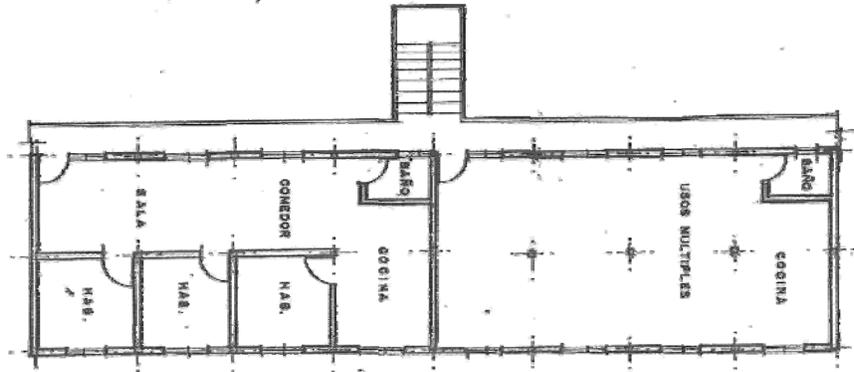
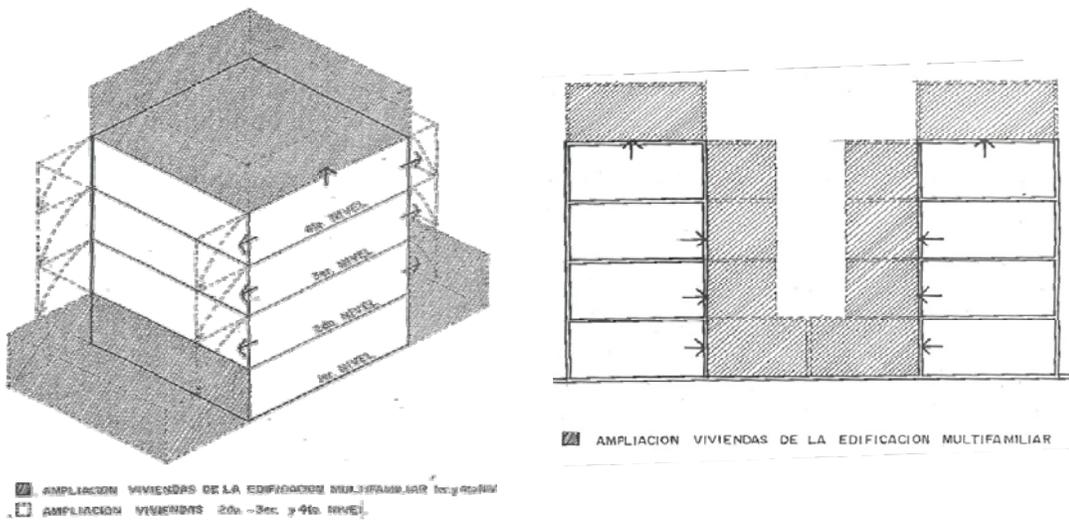
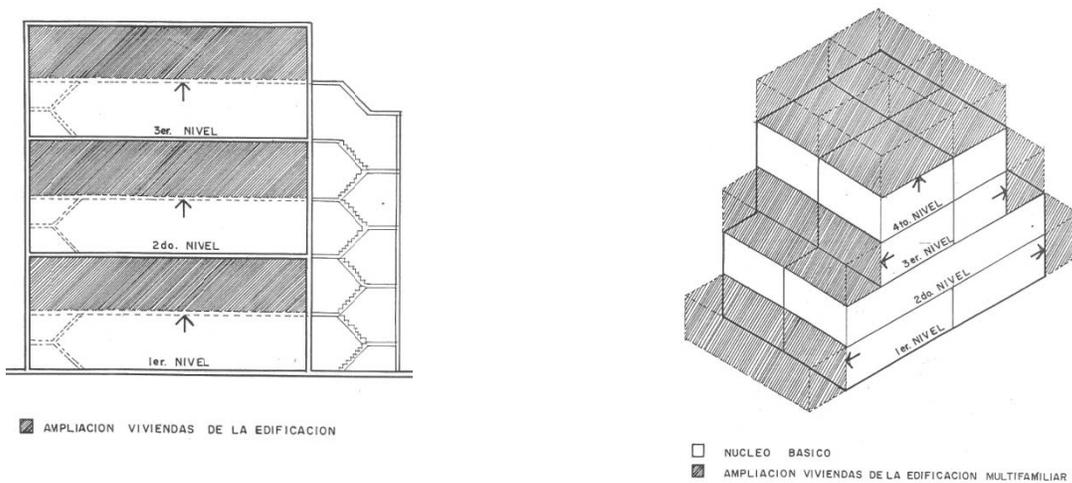


Imagen 7: Edificación multifamiliar con crecimiento hacia el interior. (Barroeta, 1999)



Imágenes 8 y 9: Edificación multifamiliar con crecimiento de las viviendas por medio de balcones. (Barroeta, 1999).



Imágenes 10 y 11: Edificación multifamiliar con crecimiento interno utilizando la losa de piso y edificación multifamiliar con crecimiento sobre terrazas y terreno aledaño a la edificación. (Barroeta, 1999).

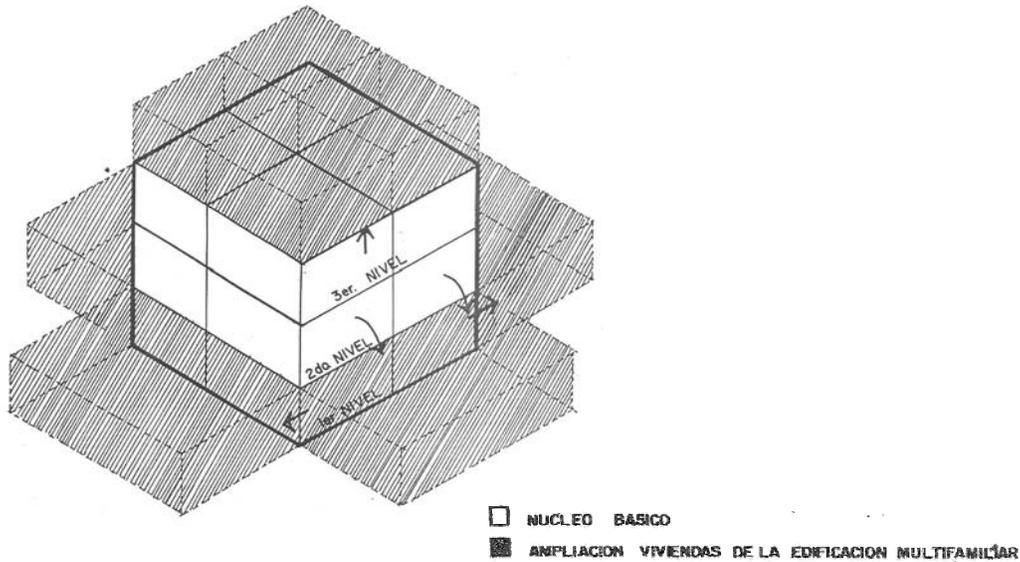


Imagen 12: Edificación multifamiliar de tres niveles con crecimiento de sus viviendas utilizando el terreno aledaño a la edificación (1^{ro} y 2^{do} nivel) y la cubierta para el tercer nivel. (Barroeta, 1999)



Imagen 13: Ejemplo de ampliación de edificio de viviendas en Madrid. Echavarrí, Pablo. Rehabilitación y ampliación de edificio de 20 viviendas (1.200 m²). 2005. <https://goo.gl/3hxJzX>

5. CASOS EN VENEZUELA

En Venezuela los casos de vivienda progresiva están bien documentados, especialmente aquellos promovidos por el Estado, en su totalidad para viviendas unifamiliares o bifamiliares, de interés social, desde la etapa de planificación. Sin embargo, para el caso que se presenta, la progresividad en edificaciones multifamiliares ha sido especialmente estudiada por la arquitecta Rebeca Velasco, quien indaga sobre las posibles causas que produjeron un crecimiento progresivo en edificaciones multifamiliares populares de baja altura, años

después de su construcción, ejecutadas por sus habitantes, según sus necesidades. En su caso, el estudio se basa en edificaciones construidas por el Estado venezolano para familias de bajos ingresos, en muchos casos sin la figura de un condominio, en donde no fue planificado el crecimiento, y constituyen un problema no solo por la incertidumbre en el proceso constructivo y los criterios de diseño, sino también por el impacto que en algunos casos produce a la edificación y su entorno.

No es de extrañar que los casos de progresividad en edificaciones multifamiliares de clase media hayan sido poco estudiados, pues como vimos anteriormente, se asocia este crecimiento de espacios, y con justa razón, solo a la clase baja o familias de ingresos bajos, mas no es exclusivo. Las razones de las ampliaciones o construcción de una segunda etapa van más allá del aspecto económico, al menos en este sector de la población venezolana. Adicionalmente no es una práctica tan extendida como puede suceder en las viviendas unifamiliares.

En algunas zonas de Caracas, reconocidas tradicionalmente por sus habitantes como de clase media, se pueden observar edificios que han aprovechado el techo, balcones, terrazas y patios para construir ampliaciones de los apartamentos de los últimos pisos o los de planta baja con frecuencia. Poco se ha visto en estos tipos de edificios la construcción de espacios adicionales, externos a las fachadas, en niveles intermedios de la edificación. Se ha de suponer que este tipo de ampliaciones conllevan un riesgo mayor, por lo cual el incremento económico en su planificación y construcción es un elemento importante a considerar, al igual que el acuerdo entre vecinos, aspectos que suelen suprimirse.



Imágenes 14 y 15: Ejemplos de construcciones extemporáneas en edificaciones multifamiliares en el sureste y este de Caracas. Fotografía: Hernández, B. (enero de 2017).

Este tipo de progresividad, de ampliación, que aprovecha el soporte existente de la estructura construida, como las que observamos en las imágenes 14 y 15, comúnmente no suelen ser planificadas o determinadas, al menos por algún organismo; por el contrario, responden a la decisión del habitante en lo que considera un espacio aprovechable, pero en todo caso constituyen unas construcciones informales, que escapan a la ley establecida en los municipios donde se construyen.

No es frecuente encontrar la participación del diseñador o alguna asistencia técnica en intervenciones de tipo ampliación o “crecedera” que se realizan en edificaciones de altura en zonas populares y de bajos recursos económicos, e incluso en zonas de ingresos

medios/altos, pues por lo general el habitante está amparado en la propia seguridad que le brinda una ampliación de “relleno” con elementos “suaves”, en donde no se interviene la estructura del edificio, por lo tanto, han de suponer que no se incurre en mayor peligro, desconociendo que esos rellenos sin planificación provocan un comportamiento estructural completamente distinto, aun sin intervenir los miembros estructurales.

No obstante, cabe aclarar que la intervención del arquitecto o diseñador no garantiza una mejor adecuación de los espacios a las necesidades de las familias, pero sí garantiza en buena medida el cumplimiento de normativas obligatorias y una menor vulnerabilidad de la edificación y sus ocupantes.

Otro tipo de progresividad que se ha observado es la progresividad interna en apartamentos, en edificaciones nuevas, multifamiliares y de mediana altura, que respondiendo a la idea de cascarón de cada apartamento, en muchos casos sin divisiones internas, incluso sin acabados, se entrega al propietario, en lo que conocemos como “obra gris” (véanse imágenes 7 y 16), de manera que la inversión para costear la terminación de la vivienda se traslada completamente de la constructora al futuro habitante, al igual que las decisiones asociadas al diseño del crecimiento interno.

En todos los casos, se puede evidenciar que las respuestas que han dado los habitantes de estos edificios a su falta de espacio, o necesidad de ampliación o modificación de su vivienda, han sido de carácter individual. Son escasas las intervenciones gestionadas por los propios habitantes, dirigidas de manera colectiva para toda la edificación.



Imagen 16: Ejemplo de apartamentos entregados “en obra gris”. Urb. Los Naranjos, Humboldt. Caracas. <https://goo.gl/ZCqp7L>

6. CONCLUSIONES

Como hemos visto a lo largo de este documento, la vivienda progresiva se puede considerar como una vivienda flexible por sus características, especialmente su adaptabilidad a los cambios espaciales y funcionales a través del tiempo; su aplicación no responde solo al hecho económico, pero sí a la falta de espacio o a la necesidad de mejorarlo, ya que ante una falta de previsión de espacios flexibles o aptos para las necesidades de la familia, el o los habitantes toman la decisión del crecimiento, modificación o consolidación de su vivienda. La población muchas veces no tiene acceso al mercado inmobiliario de viviendas completas, a veces por escasez, por inaccesibilidad económica o hasta por baja producción de dichas viviendas.

A pesar de que Pressman nos indica que en Latinoamérica no tenemos una gran clase media (comparada en proporción y cantidades con países desarrollados),³ debido en gran parte por las políticas gubernamentales, es un sector de la población poco atendido en muchos aspectos. No se deben descuidar los estudios dirigidos a la construcción en este sector de la población, pues la clase media está asociada con el desarrollo de un país.

La capacidad de modificar las viviendas existentes es mucho mayor que la capacidad de producción de nuevas viviendas. Así como Cilento (2002) lo afirma, "...esta capacidad de reproducción tiene un gran contenido de sostenibilidad dado que reduce los efectos negativos de nuevas intervenciones sobre el medio ambiente natural y prolonga la vida de las construcciones existentes y su uso por nuevas generaciones".

Existen numerosos ejemplos dentro y fuera de nuestro país, donde se ha planificado y construido este tipo de edificaciones, con un diseño determinado para la primera etapa y para las etapas posteriores, sin embargo, la aplicabilidad de la progresividad en edificaciones multifamiliares desde su concepción, así como la participación del habitante ha sido escaso. Los casos estudiados de viviendas multifamiliares de desarrollo progresivo dentro del territorio venezolano, en su mayoría se han producido en viviendas de bajo costo bajo un diseño indeterminado y bajo el control del habitante y/o la comunidad pero, como se ha visto, este fenómeno ocurre en otros ámbitos como en sectores de mayores ingresos, como la clase media, siendo su motivación diferente pero compartiendo objetivo.

Esta práctica en edificios residenciales, muchas veces autogestionada, ha ido contribuyendo al cambio del paradigma de la vivienda en cuanto a la importancia de la participación del habitante en el proceso de construcción del hábitat, un complejo proceso que evidencia que los modos de habitar son parte de un proceso social.

La participación del habitante en el diseño de su vivienda es una alternativa viable que se puede poner en práctica, no obstante, es necesario un control riguroso en ciertos aspectos que deben ser al menos supervisados por profesionales del área, especialmente para reducir la vulnerabilidad de la edificación, sobre todo si es de altura. Sin embargo, la construcción progresiva en edificios residenciales requiere de un estudio detallado de las condiciones particulares de cada uno, desde la etapa de diseño y planificación en obras nuevas, así como en obras ya construidas, puesto que el comportamiento de la edificación cambia con cada adición de elementos, así como su relación con el contexto, entre muchos otros aspectos.

REFERENCIAS

Barroeta, J. (1999). Sistema constructivo con estructura de entramado metálico para viviendas multifamiliares de desarrollo progresivo. Trabajo de Grado (Maestría). Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Cilento, A. (1999). *Cambio de paradigma del hábitat*. Caracas, Venezuela: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, Universidad Central de Venezuela. Colección Estudios.

Cilento, A. (2002). Hogares sostenibles de desarrollo progresivo. *Tecnología y Construcción*, 18 (III), 23-28.

³ Según EHM, en González A. (2014), en su medición de la distribución de la población según clases sociales en Venezuela, al 2011 la clase media se maneja en 19,7% frente a 5% de clase alta y 39,4% de la clase de menores ingresos o pobres, dejando el excedente para una clase vulnerable.

Cilento, A. (2015). Construcción sostenible. Piezas para la investigación y la acción. [CD-ROM]. Caracas: Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción-IDEC. Facultad de Arquitectura y Urbanismo - Universidad Central de Venezuela.

Gallego, A. (2012). Recuperación crítica de los conceptos de familia, dinámica familiar y sus características. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, N° 35 (febrero-mayo, Colombia), 326. Extraído el 13 de enero de 2017 de: <http://revistavirtual.ucn.edu.co/> México.

Gelabert, D. y González, D. (2013). Vivienda progresiva y flexible. Aprendiendo del repertorio. *Arquitectura y Urbanismo*, 34(2), 48-63. Extraído el 13 de enero de 2017 de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-58982013000200005&lng=es&tlng=es

Gelabert, D. y González, D. (2013). Progresividad y flexibilidad en la vivienda. Enfoques teóricos. *Arquitectura y Urbanismo*, XXXIV. Abril. Extraído el 6 de febrero de 2017 de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376834402003>

González A., L. (2014). La clase media en Venezuela. Falta de oportunidades e insatisfacción. *Revista SIC*, N° 764, 163-171. Extraído el 10 de octubre de 2017 de: http://qumilla.org/biblioteca/bases/biblio/texto/SIC2014764_163-171.pdf

Habraken, N. et al. (2^{da} ed.). (2000). *El diseño de soportes*. Barcelona, España: GG Reprints.

Martin, P., González, J.M. y Avellaneda, J. (2014). *Rehabilitación perfectible, adaptable y sostenible. Análisis y propuesta de criterios para la evaluación de la rehabilitación de edificios plurifamiliares de vivienda*. Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona Tech. Extraído el 21 de noviembre de 2016 de: <https://core.ac.uk/download/pdf/41814102.pdf>

Oteiza, I. et al. (1989). *La producción informal de viviendas: Caso Maracaibo, Venezuela*. La Universidad de Zulia, Facultad de Arquitectura,. Maracaibo. Extraído el 04 de marzo de 2017 de: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/92889/1/Informes%20de%20la%20Construcci%C3%B3n%2041%28403%29%2017-31%20%281989%29.pdf>

Pressman, S. (2011). La clase media en países latinoamericanos. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía* [en línea] 2011, 42 (Enero-marzo): Extraído el 13 de enero de 2017 de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11819774006>

Till, J. y Schneider, T. (2005). Flexible housing: The means to the end. *Theory Arq.*, vol. 9, N° 3/4. Extraído el 11 de enero de 2017 de: https://jeremytill.s3.amazonaws.com/uploads/post/attachment/36/flexible_arg_2.pdf

Velasco Di Prisco, R. (2009). Crecer en el viento. La transformación de la vivienda multifamiliar de baja altura del BO-Inavi. Trabajo de acenso a la categoría de Asistente. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

SOBRE ALAMBRES, TORONES, CABLES Y PUENTES COLGANTES EN ACERO. RASTREANDO CURSOS DE ACCIÓN, ASOCIACIONES Y TRADUCCIONES DESDE LA ONTOLOGÍA DEL ACTANTE RIZOMA (OAR)

Alejandra González V.

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), FAU.UCV.
alejandra_gonzalezve@yahoo.com

RESUMEN

Para que los puentes colgantes fueran una realidad, hubo de ser recorrido un complejo camino en el campo de la invención y la innovación de tecnologías del acero. De hecho, los puentes colgantes no existirían si el acero no hubiera sido creado por el hombre a partir de la aleación de hierro y carbono. Más adelante, el desarrollo de aceros más dúctiles y tenaces, de maquinarias capaces de elongar barras de acero hasta diámetros inimaginables, de la invención del alambre y luego el diseño del torón y, en simultáneo, los avances en el conocimiento del comportamiento de las estructuras, la sismorresistencia y los avances tecnológicos basados en la ciencia, también constituyeron factores determinantes. Los puentes colgantes han representado un gran avance para la humanidad al unir horizontes, territorios, que con las tecnologías tradicionales difícilmente hubieran podido encontrarse. La presente ponencia tiene por objetivo seguir el rastro, conjeturar, identificar señales, pasar el rastrillo por sobre la narrativa de algunos temas seleccionados para extraer de ellos una posible interpretación y comprensión del curso de acción que llevó a la aparición de los puentes colgantes. Nos basaremos en las nociones y categorías que nos ofrece la ontología del actante rizoma, propuesta por Bruno Latour y sus colaboradores: el actante, las asociaciones y las traducciones. Para ello metodológicamente hemos revisado a profundidad su obra y hemos también estudiado algunos puentes de acero emblemáticos, reconocidos por la historiografía de la arquitectura. Aspiramos a obtener una nueva mirada de mayor complejidad y acercamiento a la realidad sobre los caminos o senderos que atraviesa el desarrollo y la innovación de las edificaciones construidas con acero, en especial los maravillosos puentes colgantes de acero.

Palabras clave: puentes colgantes de acero, ontología actante rizoma, asociaciones, traducciones.

A MODO DE INTRODUCCIÓN

Problematizando la forma en que hasta ahora se ha explicado el desarrollo tecnológico y la innovación

La tecnología¹ en cualquiera de sus formas surge de la aplicación del conocimiento científico en la producción de bienes y servicios para la vida del hombre. Este vínculo con el desarrollo de la ciencia diferencia a la tecnología de la técnica (tekné) que tiene sus orígenes en la práctica en sí misma y la experiencia empírica y también la distingue de la ciencia en cuanto a su viabilidad y factibilidad de aplicación a la vida misma y al progreso de la humanidad.

En esta ponencia nos referiremos específicamente a las tecnologías desarrolladas en el campo de la construcción en acero.

El desarrollo tecnológico ha venido siendo explicado tradicionalmente desde enfoques históricos y/o sociológicos, vale decir, desde explicaciones del estudio de la sociología de la ciencia y la relación ciencia-tecnología, en las cuales se ponen en valor: pasos evolutivos asociados a épocas específicas, avances incrementales o radicales vinculados a hitos históricos particulares, influencia de la relación que se da entre actores clave y factores circunstanciales, entre otros aspectos.

La presente investigación tiene como objetivo dar una mirada desde un novedoso punto de vista que arroja luces de otro orden, develando nuevas representaciones sobre este trascendental hecho. Y abriendo curso de acción para transitar hacia el fortalecimiento del desarrollo tecnológico y la innovación de forma más eficaz.

La ontología del actante rizoma como marco conceptual para una nueva interpretación. Cursos de acción, asociaciones y traducciones

Por una senda de descubrimiento que quizá nace en Kant, continúa en Kuhn, prosigue con Heidegger-Gadamer-Derrida-Foucault, la modernidad, el giro interpretativo, la posmodernidad y el post-estructuralismo, descubrimos a Bruno Latour. En él y en su pensamiento, encontramos un escenario epistemológico cargado de nociones, conceptos y métodos² que nos resultaron familiares, confortables y poderosos.

Bruno Latour –filósofo, sociólogo de la ciencia y antropólogo francés aún vivo–, junto a Michael Callon, concibió la Teoría del Actor Red (ANT), más adelante, ontología del actante rizoma (OAR), dentro de la visión epistemológica constructivista de la ciencia y la tecnología.³ Se les atribuye a estos autores la consideración de que la tecnología cumple una función mediadora en las relaciones sociales, lo cual le otorga un rol de actor social del mismo nivel que el que tradicionalmente otras ontologías han otorgado solo al humano. Así entonces, lo humano y lo no humano alcanzan el mismo estatus, hay simetría y no es posible dominación de lo humano sobre lo no humano, o viceversa, acabando de esta forma con las

¹ Tecnología “es el conjunto ordenado de todos los conocimientos usados en la producción, distribución (a través del comercio o de cualquier otro método) y uso de bienes y servicios. Por lo tanto, cubre no solamente el conocimiento científico y tecnológico obtenido por investigación y desarrollo, sino también el derivado de experiencias empíricas, la tradición, habilidades manuales, intuiciones, copia, adaptación, etc.” (Jorge A. Sabato y Michael Mackenzie, 1982).

² La identificación de cursos de acción en la narración es uno de los métodos propios de esta ontología. Permite rastrear las asociaciones que en cada caso han determinado la existencia de algo, una tecnología, etc. y a su vez permite conseguir vestigios de sus actantes.

³ Para Latour (1991), la “Tecnología es la sociedad que se hace duradera”. Aun cuando el humano individual o colectivo que la ideó no exista, ella perdura y sigue cumpliendo su función y puede ser objeto de nuevas traducciones y delegaciones.

polaridades y dualidades entre humano y tecnológico, naturalidad y artificialidad, sujeto-objeto, entre otras.

La ontología del actante rizoma (OAR) es una sociología de las asociaciones. Tanto actantes como redes son determinantes, no puede reducirse la comprensión de la realidad a uno u otro de forma aislada; se trata de un “entramado social sin costuras –narración continua sin fases–, en el cual toda relación social está mediada por artefactos y componentes no humanos en un tejido socio-técnico” Latour (1999).

Las denominaciones de actante y rizoma poseen antecedentes importantes. Lucien Tesnière, lingüista francés, autor de la Teoría Sintáctica, designa al “actante” como el participante (persona, animal, cosa u evento) en un programa narrativo.⁴ En cada programa narrativo intervienen diferentes actantes que poseen roles actanciales, que son los que dan origen a la posibilidad de crear nuevos modelos, conceptos y artefactos. Por su lado, Gilles Deleuze – filósofo, historiador y teórico social francés– y Félix Guattari –filósofo, psicoanalista y teórico social, también francés–, basándose en el concepto del rizoma botánico, derivan un concepto filosófico en su libro *Capitalismo y esquizofrenia* (1972-1980), el modelo rizomático, una imagen de pensamiento que representa las multiplicidades.

La polémica ontología del actante rizoma y su correlato epistemológico y metodológico parte de estas nociones para romper de manera rotunda con las visiones dualistas sujeto-objeto del positivismo, y plantea una teoría de la mediación técnica en la que se da un proceso de “encantamiento”, que Fernández ⁵ (1993, p. 119) explica de la siguiente forma:

...hay una relación nueva entre sujeto y objeto, de simpatía o antipatía suficientemente justificable...el sujeto dota al objeto de conocimiento, esto es, le inculca, le otorga sus propios pensamientos y sentimientos. Luego permite que el objeto los desarrolle en términos suyos según su naturaleza,...el sujeto es sensible al objeto: El objeto en reciprocidad, le otorga al sujeto sus características;...

El desarrollo de tecnologías y/o componentes constructivos, como veremos más adelante, está lleno de nuevas asociaciones y algunos encantamientos que conducen a acciones de mediación técnica que van abriendo “cursos de acción”.

La mediación técnica toma forma, en palabras de Latour, a partir de algunas estrategias, a saber:

1. *Traducción*: unión de dos agentes que crean uno nuevo (actor o agente híbrido), que posee un nuevo objetivo que solo se da con la existencia de ambos actores. También, todas las negociaciones, intrigas, actos de persuasión o rodeos, gracias a los cuales un actor consigue la adhesión de los otros actores. La traducción es un proceso de lucha (agónico), que exige gran esfuerzo y no tiene final y que se da en varias fases: cambio de los objetivos de un actor para adaptarlos a los de otro (formación del actor híbrido), cambio de objetivos generales u ofrecimiento de la tecnología a nuevos

⁴ El “actante” es una pieza clave del teatro semiótico. Es ilustrativo de un doble movimiento inductivo-deductivo en el análisis semiótico; se utiliza en las tendencias de análisis del discurso y se basa en el análisis de aspectos empíricos de relatos o en el análisis de los programas narrativos. Tiene su origen en los cuentos populares rusos.

⁵ Pablo Fernández Christlieb es profesor de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Ha aportado la noción de epistemología del encantamiento, inserta también en el marco de los paradigmas constructivistas del conocimiento.

actores o reorganización de intereses y objetivos para vencer las dificultades. Por supuesto, toda traducción implica un cambio de lenguaje.

2. *Simetría*: consistente en la necesaria asociación de elementos humanos y no humanos para que se dé la acción, asignándoles igual importancia, peso o posibilidades.
3. *Cajanegrización*: la tecnología es comprensible para nosotros mientras funciona bien o tiene éxito, pero cada uno de los aspectos que la componen internamente nos son desconocidos. La cajanegrización es, en palabras de Latour:

...camino mediante el cual el trabajo científico o técnico se vuelve invisible a causa de su propio éxito. Cuando una máquina funciona eficientemente o un hecho está establecido con firmeza, uno sólo necesita concentrarse en los beneficios que genere y no en su complejidad interior. Así, paradójicamente, sucede que la ciencia y la tecnología cuanto más éxito obtienen más opacas se vuelven.

En oposición a esta noción está la descajanegrización, típicamente latouriana, entendida como la acción que permite desvelar los aspectos internos no conocidos por el observador o usuario para hacerlos emerger y poder abrir nuevos cursos de acción.

4. *Delegación*: Es la que permite un desplazamiento del significado y a vez la traducción de la acción en una nueva acción o expresión tecnológica. Permite que la acción que se hizo en otra época y por otro agente (aunque ya no exista) siga teniendo efectos y haga que la sociedad sea sostenible, debido a que de esta forma el resultado de las asociaciones es incorporado (tecnología incorporada)⁶ a materiales y componentes que duran más que las relaciones personales que las generaron y se hagan sostenibles⁷ y se reproduzcan en el futuro.

La ductilidad en el acero. Un actante clave en el proceso de traducción

La ductilidad es la propiedad que ostentan ciertos materiales metálicos como el hierro, el acero y los asfálticos, que les permite alcanzar grandes deformaciones plásticas sin llegar al punto de rotura. Es un actante tecnológico, si lo vemos como el actor híbrido resultante de la asociación de actantes antecedentes hierro+carbono-oxígeno+temperatura+coque+etc.-etc... que aún continúa transformándose. Lo contrario de un material dúctil, es un material frágil. Los materiales dúctiles también pueden romperse pero lo hacen de forma tardía, luego de haber sufrido profundas deformaciones. Un material dúctil mientras más se estira disminuye su sección transversal; el estiramiento es inversamente proporcional al área de la sección.

El hierro fundido y el forjado –primeras versiones utilizadas en la construcción– tenían ductilidades limitadas debido a la cercanía de sus propiedades físico-mecánicas a las originales del óxido de hierro (forma de encontrar el hierro en la naturaleza). De allí que la forma de los primeros puentes de acero haya estado aún muy asociada a la concepción formal y estructural de los puentes de arco de piedra, cuya respuesta estructural está basada en el comportamiento a flexo-compresión.

⁶ Latour y sus colaboradores parten del supuesto estratégico según el cual, “si un conjunto de «relaciones sociales» se incorporan a materiales que son más duraderos que la interacción personal, es muy probable que esas relaciones sociales se reproduzcan”. Como puede observarse, esto va mucho más allá del concepto de “tecnología incorporada”, planteado por Sábato y Mackenzie.

⁷ Latour habla de estabilización como períodos de estabilidad que suponen un espacio-tiempo, en el cual las tecnologías aportan significado al entramado sociotécnico.

Sin embargo, en la medida en que fueron evolucionando las aleaciones⁸ con otros metales y progresando las formas de producción de acero luego de la Revolución Industrial por la oxidorreducción con coque, la invención del convertidor vertical e inclinado, el laminador universal y otros tantos actantes, estas propiedades fueron transformándose y se tuvo por fin acceso a aceros más dúctiles, resistentes y tenaces.

De inmediato surgen nuevos “cursos de acción” y asociaciones, nuevos eslabones en la cadena de producción, en consecuencia, nuevos componentes constructivos; el alambroón, el alambre y más adelante los torones encuentran lugar para su aparición, resultado claro de nuevas traducciones tecnológicas.

ACTANTE RIZOMA 1

IRON BRIDGE, PRIMER PUENTE DE ACERO

Si bien el Iron Bridge no es un puente colgante, es un hito clave en este rastreo de cursos de acción, ya que es considerado el primer puente en el cual el hierro fundido fue utilizado estructuralmente, “el primer uso del metal para una estructura” (McCormac, 2009). El Iron Bridge sobre el río Severn en Inglaterra, llamado también el puente de arco de Coalbrookdale (Figura 1), es la materialización de una nueva traducción. Su forma en arco obedece aun a la lógica estructural y constructiva de los puentes de piedra, y a la vez revela las aún limitadas propiedades mecánicas del hierro fundido para ser sometido a esfuerzos de tracción y a su gran versatilidad para ser moldeado. La existencia de una familia con tradición en fundición de hierro y capacidad productiva permitió el desarrollo de una nueva forma de fundir acero a base de coque, que representó un avance importante en la técnica utilizada hasta el momento.⁹



Figura 1: El Iron Bridge de sir Abraham Darby III. Río Severn. Inglaterra, 1779.

⁸ Las aleaciones son uniones metalúrgicas del hierro o el acero con otros metales. Sin embargo, la aleación fundamental es la que da posibilidad de existencia al acero, hierro+carbono en bajos porcentajes.

⁹ Abraham Darby introdujo hacia 1709 una nueva manera de reducir el hierro (es decir, eliminarle oxígeno, utilizando en vez de carbón vegetal y fuelle, coque y alto horno. Así creó una forma más económica de producir hierro fundido y sin saberlo abrió un curso de acción en materia de producción más sustentable, dado que se disminuyó la tala de árboles para la producción de carbón vegetal. Entre los antecedentes que permitieron la existencia de este curso de acción estuvieron: experiencia en fundición con coque de un bisabuelo de Abraham Darby, existencia de experiencia en fundición y la tradición familiar en Bristol, visión creativa de Darby, y destrucción y posterior reparación de un horno en Coalbrookdale, que abrió espacio para el cambio de modalidad de fundición del hierro.

Abraham Darby III en la Inglaterra de 1779, se constituyó en un actor híbrido, al ser heredero de la famosa fundición de hierro en la cual por primera vez se fundió hierro con coque, productor de hierro de mayor pureza, resistencia y menor costo y promotor de la construcción del Iron Bridge.

Las dificultades enfrentadas en esta experiencia sentaron las bases para ir a la búsqueda de elementos estructurales más livianos, como lo fueron las vigas de celosía, y cerchas más adelante, aspecto este que también actuó en la construcción del curso de acción hacia los puentes colgantes.

ACTANTE RIZOMA 2

LAMINADOR UNIVERSAL Y TRENES DE PERFILAMIENTO

Hasta el momento de la aparición del primer laminador universal cercano a la Revolución Industrial y la creación de la máquina de vapor, el moldeo del hierro se realizaba de forma manual: forjado o fundido, "...a golpe de martillo...o se vertía en moldes de arena" (Strike, 2004, p. 21).

La invención del laminador universal aun en sus más rudimentarias versiones, abrió un curso de acción específico y claro en lo relativo a las posibilidades de fabricación de productos semiterminados (planchones) más finos y también barras más delgadas (alambres).

Tanto láminas muy delgadas como alambres muy finos requieren en su fabricación de procesos de laminación en caliente y procesos de laminación en frío. Los calientes, también llamados laminación primaria, y los segundos, laminación secundaria, aportan cada uno a temperaturas distintas mejoras en las propiedades físico-mecánicas del acero con que se fabrican los diversos componentes.

Más allá de la primigenia función de aplastar planchones o alargar palanquillas, la incorporación de mordazas, mandriles o dados de conformado abrió nuevas posibilidades en la fabricación de láminas muy delgadas, barras, alambres, a partir del uso de trenes de perfilamiento continuo en frío con parejas de dados. Más tarde, con el aporte de la tecnología del trefilado,¹⁰ las posibilidades de elaborar alambres muchos más delgados y dúctiles se hizo realidad.

Detrás de cada paso evolutivo en la consecución de nuevas formas de procesar el acero, hay una serie de nuevas asociaciones, tanto humanas como no humanas, que determinan las nuevas traducciones, delegaciones y estabilizaciones¹¹ que hacen posible el desarrollo de nuevas tecnologías e innovación.¹²

¹⁰ El trefilado es la operación por conformado que permite disminuir la sección transversal de un alambre.

¹¹ Las estabilizaciones son desplazamientos que se hacen permanentes en el tiempo. Es una noción propia de la OAR.

¹² Los rieles o raíles de ferrocarril fueron determinantes en la existencia de las vigas T para la construcción, que abrió las posibilidades de fabricación de edificios altos y rascacielos, que era imposible lograr con las técnicas tradicionales de muros de ladrillos. Sin embargo, la T tomada directamente de los rieles ferroviarios no resultaba la forma óptima para resistir las cargas, tanto de miembros de columna o viga. Entonces, una investigación experimental realizada partiendo de los avances en el conocimiento estructural de la ingeniería, determinó la necesidad de crear las dos alas de la tan conocida hoy día "doble T". De esa forma, este componente tan vigente aún hoy pasó a responder de manera óptima a las sollicitaciones estructurales de las edificaciones.

ACTANTE RIZOMA 3

BARRAS-ALAMBRES-TORONES-CABLES

Una vez que los aceros empezaron a evolucionar, producto de la utilización del convertidor, de nuevas aleaciones y de la evolución de los laminadores, se hizo posible producir barras de secciones cada vez menores: alambres, alambres¹³ y finalmente cables.

Cada uno de ellos es un paso evolutivo en la fabricación de componentes para la construcción y permitió a su vez, aguas abajo, crear nuevos cursos de acción. Las barras fueron evolucionando hacia sofisticados relieves y diámetros menores, que permitieron el desarrollo de dos nociones cruciales para la evolución de la tecnología del concreto armado: la adherencia entre la barra de acero y el concreto, y las cabillas de tres octavos para realizar zunchos y estribos, que mejoraron notoriamente la eficiencia de los miembros de concreto frente a los esfuerzos de compresión, tracción y flexión.

La posibilidad de fabricar alambres alargando barras industrialmente, propició la elaboración de cables. Un cable¹⁴ es la reunión de varios torones,¹⁵ diseñado especialmente para obtener una mayor resistencia a las deformaciones por tracción. Ellos forman un todo, es decir, un componente constructivo complejo con tecnología incorporada. Los mismos pueden agruparse en capas de forma plana alrededor de un alambre central o enrollados helicoidalmente formando cables espirales. Estos últimos ofrecen una resistencia mayor debido a la energía acumulada por la torsión de los alambres.



Figura 2: 1. Alambre 2. Torón 3. Cable

¹³ El alambre es obtenido por estiramiento al reducir el diámetro del alambres, haciéndolo pasar por dados o matrices mediante la aplicación de una fuerza axial. Las propiedades del alambre dependen básicamente de su composición química, microestructura, nivel de inclusiones, tamaño de grano, segregaciones y condiciones del proceso. Todos los alambres deben cumplir con los requisitos establecidos en las normas ASTM A 1007, JIS G 3525, API 9 A, RRW 410 F, ISO 2232.

¹⁴ Los cables de acero están constituidos por alambres de acero, generalmente trenzados en hélice (espiral); esta torsión helicoidal aumenta la capacidad de resistir los esfuerzos de tracción del acero (Figura 2).

¹⁵ Están formados por alambres que pueden ser todos del mismo o de diferentes diámetros, trenzados helicoidalmente sobre un alma central (Figura 3).

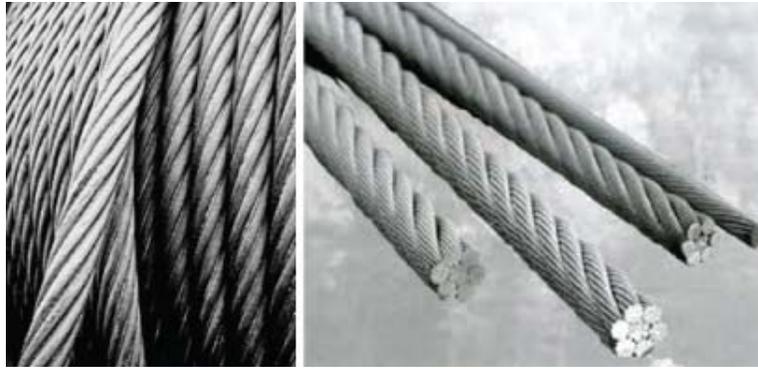


Figura 3: Alambre trefilado y cable a base de torones agrupados en torsión.

ACTANTE RIZOMA 4

EL PUENTE DE BROOKLYN, PRIMER PUENTE COLGANTE MODERNO EN ACERO DEL MUNDO

El desarrollo de puentes colgantes es sin duda el gran salto para tratar de llegar más lejos con menos apoyos. El desarrollo de la técnica de las cadenas de acero, y más tarde la del cable de acero, fue crucial. Algunos de los puentes colgantes realizados en la primera etapa resultaron dañados muy rápidamente debido a su excesiva ligereza, fueron presa de tornados, vientos y las oscilaciones del propio tráfico. Sin embargo, ellos abrieron el camino al desarrollo de los magníficos puentes colgantes que existen hoy día en el mundo. Frampton (2002) nos dice:

Dado que la fabricación de eslabones de hierro forjado capaces de resistir tracciones siempre fue una cuestión arriesgada y cara, la idea de usar cables a base de alambres tensados en lugar de cadenas parece que se les ocurrió por vez primera en 1816 a White y Hazard,, y más tarde a los hermanos Seguin...

Fue en Estados Unidos donde se construyó el primer puente colgante moderno del mundo, el de Brooklyn (Figura 4). Su autor, uno de los primeros inmigrantes alemanes, John Roebling (1806-1869), había realizado un poco antes uno de los aportes más importantes a la técnica de colgar puentes, su patente del cable de alambre de 1842. “Los cables de Roebling



Figura 4: Vista del puente de Brooklyn de Roebling, Nueva York, Estados Unidos. Detalle de los cables con escala humana. (Fotos cortesía de la ingeniera Gladys Maggi)

estaban retorcidos helicoidalmente como los de Vicat¹⁶ (Frampton, 2002).

El puente de Brooklyn tardó en construirse casi 14 años, lo que significó ocho años más de lo previsto en el proyecto original, a un costo de 15 millones de dólares, el doble de lo presupuestado inicialmente. Fue concebido por su autor en 1855 y se inició su construcción en 1865 (Dupré, 2000).

El tramo central del puente cuelga de cuatro grandes cables portantes de acero, de los cuales penden a su vez cerca de 800 cables verticales, también de acero galvanizado.

En este puente, que constituyó la última obra de Roebling y que le costó la vida,¹⁷ fue posible gracias a la tecnología del cable de acero galvanizado. Los cables se sumergieron en tinajas de cinc fundido, que generaron una protección metalúrgica a los alambres de acero (Derry y Williams, 1995).

ACTANTE RIZOMA 5

PUENTES COLGANTES CONTEMPORÁNEOS. SANTIAGO CALATRAVA, UN EXPONENTE

Cilento (2000) expresa que “el diseño y construcción de puentes ha sido dominio casi exclusivo de los ingenieros”. Sin embargo, en las últimas décadas ha habido un importante repunte en materia de puentes colgantes, que se origina en la disciplina de la arquitectura, por supuesto, con el apoyo de la ingeniería.

En esta nueva dimensión de la arquitectura y la construcción se destaca, en nuestra opinión, la obra del ingeniero, arquitecto y escultor español Santiago Calatrava. A pesar de la polémica en torno a sus obras relativo a costos de construcción, mantenimiento y tiempos de ejecución, el autor ha proyectado y construido más de 40 puentes de pequeño formato de función peatonal. Cada uno de sus puentes es un prototipo construido en el laboratorio de la vida real; en cada uno de ellos el arquitecto-ingeniero-escultor ha puesto a prueba sus planteamientos e ideas y se ha trazado nuevos propósitos.

Calatrava ha diseñado y construido también una muestra destacada de puentes de casi 200 metros de longitud, que dan fe de su capacidad para fusionar lo escultórico con lo estructural, a partir de propuestas absolutamente estéticas y funcionales, en las cuales el concepto del puente colgante es llevado a límites retadores.

Sus puentes desbordan una imagen aerodinámica. Se le considera el constructor de puentes más creativo y polémico del panorama actual y ha logrado borrar las fronteras entre arquitectura e ingeniería (Dupré, 2000). Se reconoce el aporte de sus obras al estímulo vital de varias ciudades y la reactivación de su atractivo turístico.

El más largo de sus puentes es el de Alamillo sobre el río Guadalquivir, en la ciudad de Sevilla, España. Un puente colgante de 250 metros de longitud, del tipo atirantado, con un pilón o mástil inclinado a manera de contrapeso, con 13 cables tensores. Otro, el puente colgante de Lusitania sobre el río Guadiana, une el casco antiguo de la ciudad de Mérida con la nueva zona denominada El Polígono. Un puente con tramo central de 189 metros de longitud (Figura 5).

¹⁶ Louis Vicat (1786-1861). Ingeniero francés experto en evaluación de puentes. Si bien se le vincula más al material concreto, sus estudios de puentes le permitieron realizar grandes aportes al conocimiento de puentes colgantes y cables.

¹⁷ Roebling murió tres semanas antes de colocar la primera piedra de la construcción del puente, como consecuencia de un accidente durante la ubicación en sitio de los pilotes de una de las torres



Figura 5: Puentes de Alamillo y Lusitania, de Santiago Calatrava

Los puentes de Calatrava utilizan no solo las más sofisticadas aleaciones de acero, que le conceden a los miembros estructurales resistencia, a la vez que ligereza, sino que además integran el manejo de la forma y el equilibrio con los conceptos más innovadores de sismorresistencia, a base de amortiguadores, tirantes, rigidizadores, sistemas computarizados, nodos inteligentes y contrapesos. Sus obras son excelentes ejemplos de nuevas asociaciones y dejan abiertos cursos de acción retadores para las próximas generaciones.

REFLEXIONES FINALES

El rastreo de nuevos cursos de acción que hemos realizado a partir de la revisión de estos cinco hitos rizomáticos, nos permite abrir nuevas comprensiones sobre el desarrollo de viejas y nuevas tecnologías. Cambian la visión de un sujeto “inventor” que crea de manera individual, genial e inspirada, la tecnología como producto de una línea evolutiva de inventos o la innovación como consecuencia de la aplicación de un método previamente establecido, y dan paso a una representación de mayor complejidad y riqueza, aquella que percibe la delicada red de asociaciones que se tejen en torno a cada hito no solo entre entes humanos, sino también reconociendo el impulso que entes no humanos aportan a la construcción de cursos de acción.

En los casos estudiados hemos podido apreciar cómo la incorporación de un nuevo elemento, proceso o maquinaria, modifica uno preexistente y este obtiene nuevas propiedades que le abren nuevas posibilidades de uso, como hemos podido ver en el caso del hierro y el acero. También hemos observado cómo la experimentación y la generación de nuevo conocimiento abre una caja negra, como en el caso del uso inicial de cadenas para colgar puentes y la posterior hibridación de las nociones de cadena-ductilidad-cable de White, Azard y los hermanos Seguin, para generar los actuales torones, actantes que con su potenciada capacidad para resistir los esfuerzos de tracción permiten hoy día la construcción de modernos puentes colgantes.

Las acciones de Roebling para sortear la dificultad que planteaba la construcción de un puente colgante hacia mediados de 1800, es demostrativa de su capacidad para construir nuevas asociaciones y buscar caminos alternativos.

La comprensión del desarrollo tecnológico como una red de asociaciones que se manifiesta a partir de traducciones, delegaciones, rodeos, desplazamientos, descajenegrizationes, nos provee una visión mucho más cargada de sentido y abre la posibilidad de evaluar y rediseñar

los cursos de acción que hemos de tomar para lograr nuevos avances tecnológicos en la construcción en acero.

La valoración simétrica a los diversos actantes humanos o no, entendiendo su rol, su potencial de contribución y creando la posibilidad de nutrir el escenario y la narrativa del desarrollo tecnológico, de inventar nuevos lenguajes, nuevos colectivos, nuevos mundos, nos permite percibir la otredad, lo no familiar, no como amenaza sino, por el contrario, como estimulante mundo por explorar.

Hoy ya no están Paxton, Siemens, Martin, Eiffel, Roebling, Seguin, Darby, White, Vicat, Azard y algún día que esperamos lejano, tampoco lo estarán Calatrava ni Latour, sin embargo, como dice este último, en el cable, el acero, el torón, el puente colgante o la viga doble T, ha quedado la impronta de la sociedad duradera, han quedado impresas las huellas de las asociaciones que lo auspiciaron, se han abierto mil cajas negras y ha quedado sembrada la semilla de los cursos de acción que vendrán, de los nuevos retos que habrán de resolver las generaciones futuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, L. (2006). *Estructuras de acero. Conceptos, técnicas y lenguaje*. São Paulo: Zigue Editora.

Araujo, R. (1998). Construir en acero: forma y estructura en el espacio continuo. *Tectónica*, 9. Acero I. Madrid: ATC Ediciones.

Arnal, E. (2000). *Lecciones de puentes*. Caracas: Altolitho, C.A.

Cilento, A. (2000). Puentes y puentes colgantes. *Tecnología y Construcción*, N° 16 II. Caracas: IDEC/FAU/UCV.

Derry, T. y Williams, T. (1995). Historia de la Tecnología. Desde 1750 hasta 1900. Volumen 2. Buenos Aires: Siglo XXI Editores.

Donald, A. Pradeep, F. y Wendelin, W. *Ciencia e ingeniería de materiales*. Cengage Learning.

Dupré, J. (2000). *Puentes. La historia de los puentes más famosos e importantes del mundo*. Colonia: Konemann.

Fernández, P. (1993). *El conocimiento encantado. El sabor del saber*. Editorial Archipiélago.

Frampton, K. (2002). *Historia crítica de la arquitectura moderna*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S.A.

Gutiérrez, A. (1997). *Manual de Estructuras de Acero*. Tomo I. Caracas: Properca, C.A.

Jurado, J. (1998). Hierro sublimado. *Tectónica*, 9. Acero I. Madrid: ATC Ediciones.

Latour, B. (1991/1993). *Nunca hemos sido modernos. Ensayos de antropología simétrica*. Madrid: Debate.

Latour, B. (1999/2001). *La esperanza de Pandora. Ensayos sobre la realidad de los estudios de la ciencia*. Barcelona: Gedisa.

Latour, B. (2002). *Morality and technology. The end of the means. Theory, culture and society*. Barcelona: Gedisa.

Latour, B. (2005). *Reassembling the social: An introduction to actor-network-theory*. Oxford: Oxford University Press.

- McCormac, J. (2002). *Diseño de estructuras de acero*. México: Alfaomega Grupo Editor.
- McCormac, J. (2009). *Diseño de estructuras metálicas*. México: Alfaomega Grupo Editor.
- Mainstone, R. (2008). *Developments in structural forms*. London: Architectural Press: Routledge-Taylor & Francis Group.
- Sábato, J. y Mackenzie, M. (1982). *La producción de tecnología. autónoma o transnacional*. México: Editorial Nueva Imagen.
- Safina, S. y González, F. (2011). *Diseño de estructuras de acero con perfiles tubulares. Industrias*. Caracas: Unicon, C.A.
- Silva, M. (2009). *Estructuras metálicas en la arquitectura venezolana 1874-1935. El carácter de la técnica*. Caracas: Ediciones Facultad de Arquitectura y Urbanismo, UCV.
- Strike, J. (2004). *De la construcción a los proyectos. La influencia de las nuevas técnicas en el diseño arquitectónico, 1700-2000*. Barcelona: Editorial Reverté.

PRESENTE Y FUTURO DE LA TECNOLOGÍA DEL CONCRETO. LA EXPERIENCIA DEL IDEC

Idalberto Águila Arboláez

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), FAU.UCV.
idalbertoaguila@gmail.com

RESUMEN

El concreto producido a partir de cemento Portland es originario del siglo XIX. Desde ese momento y hasta hace pocas décadas experimentó muy pocas variaciones en la tecnología para su producción y uso. Sin embargo, desde finales del siglo pasado se han venido incorporando nuevos materiales y desarrollando nuevas técnicas de elaboración, las cuales han provocado cambios trascendentales en sus propiedades y sus posibilidades de utilización. En este artículo se ofrece una panorámica de algunas de las principales tendencias de la innovación en el área de la tecnología del concreto. Se parte del análisis del impacto ambiental que genera la producción y uso de concreto, de la forma tradicional, lo cual sirve de fundamento para las investigaciones que se adelantan a nivel internacional y en particular en Venezuela. A partir de aquí se realiza una revisión de los avances internacionales más importantes, tomando en cuenta la bibliografía especializada más actualizada. Seguidamente se muestran resultados de las investigaciones más recientes y las nuevas propuestas del Grupo de Concreto del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción. La revisión refleja cómo se trabaja en busca de la racionalidad, la economía y sobre todo la sostenibilidad del planeta. Se destaca una fuerte tendencia a la utilización de adiciones puzolánicas y aditivos superplastificantes, tanto en forma separada como combinadas, para mejorar considerablemente algunas de las principales propiedades del concreto. Igualmente, la nanotecnología se aplica en la elaboración de concreto, con la incorporación de nanopartículas, que en unos casos mejoran apreciablemente algunas de sus propiedades y en otros aportan funciones novedosas al material. Entre otras destacan: reducir la contaminación del aire, aportar al concreto la capacidad de autolimpiarse de la contaminación, así como de autorrepararse, sellando las grietas que normalmente y por diversas causas aparecen en los elementos fabricados con este material.

Palabras clave: sostenibilidad, concreto, tecnologías constructivas, nuevos materiales.

A MODO DE INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y el desarrollo económico mundial, sobre todo de los países del llamado Tercer Mundo y en especial del sureste de Asia, han traído como consecuencia una fuerte presión sobre el medio ambiente, lo cual es motivo de preocupación global. En particular la actividad de la construcción se presenta como uno de los factores que mayor impacto provoca sobre la naturaleza.

No se puede hablar de construcción sin mencionar a los materiales de construcción, como ya hoy no se puede hablar de materiales de construcción obviando su impacto ambiental. Pocas actividades humanas afectan tanto al medio ambiente como la producción y uso de materiales de construcción.

A los ritmos actuales de consumo de materiales de construcción, se prevé un futuro insostenible para una actividad que constituye un elemento básico para el desarrollo económico de estos países. La construcción es fundamental para garantizar la eliminación de la pobreza y mejorar el bienestar de la población en general.

Si bien los patrones de consumo de materiales, en estos momentos, ponen en peligro la sostenibilidad del planeta, tampoco se puede garantizar un mundo sostenible con los niveles actuales de pobreza y subdesarrollo. Se trata entonces de encontrar fórmulas que permitan mantener y acelerar los ritmos de desarrollo actuales pero disminuyendo el impacto que este provoca en el medio ambiente.

El concreto en particular merece una atención especial. Si bien su impacto ambiental por unidad de medida puede ser inferior a otros materiales estructurales, como el acero o el aluminio, los grandes volúmenes que se necesitan en la mayoría de las obras, hace que se requieran esfuerzos importantes para utilizarlo de manera mucho más racional y tratar de ahorrarlo sustancialmente.

La tecnología para la elaboración y uso del concreto permaneció poco alterada desde su descubrimiento en el siglo XIX hasta finales del siglo XX, momento en que comenzó una verdadera revolución, que continúa y se acelera actualmente. Cada día surgen en muchos países, nuevos adelantos, sobre todo materiales que se adicionan a las mezclas de concreto para mejorar sus propiedades. Esto se traduce en reducciones en su consumo y en aportes de propiedades y posibilidades de utilización que lo hacen más ecológico.

En este artículo se presenta una revisión de algunos de los avances más importantes que se han logrado a nivel internacional, con énfasis en la experiencia del Grupo de Concreto del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC).

1. ARTÍCULO

1.1. Impacto ambiental de la producción y uso del concreto

Establecer de manera precisa y completa el impacto ambiental que genera la producción y uso del concreto es una tarea compleja y se aleja de los objetivos de este trabajo. Sin embargo, un análisis aproximado de las formas en que la producción de cada uno de sus constituyentes impacta sobre el ambiente, puede ofrecer una idea de si se está dando un uso adecuado a este maravilloso material y, sobre todo, cuáles son aquellos procesos donde se puede incidir de manera más decisiva para disminuir ese impacto.

1.1.1. Cemento

El cemento es el constituyente principal del concreto. Es quien le da esa capacidad aglomerante de, en una primera fase, tener una consistencia líquida o pastosa, adoptando casi cualquier forma, y luego fraguar y endurecer hasta adquirir una consistencia sólida y convertirse en una roca.

Pero desde el punto de vista ambiental es el que mayor impacto genera. Los efectos más notables están en el consumo de materias primas naturales, el consumo energético y las emisiones.

1.1.1.1. Consumo de materias primas naturales

La producción mundial de cemento en el año 2012 (Index Mundi, 2013), supera los 3.830 millones de toneladas (t) anuales. Si partimos de que para producir una tonelada de cemento se consumen, aproximadamente, 1,6 toneladas de materias primas naturales, esto indica que anualmente se deben extraer de la naturaleza más de 6.128 millones de toneladas de caliza y arcilla de primera calidad, las cuales nunca serán renovadas.

Asociado a la extracción de materias primas aparece otro fenómeno, que es el deterioro de la capa vegetal y de casi todo tipo de vida animal o vegetal, en el área de emplazamiento de la cantera.

1.1.1.2. Consumo energético

Según Cachán (2001), en la obtención del clinker se requiere quemar en el horno una cantidad de combustible capaz de generar una energía de 3.200 a 5.500 MJ/t de clinker, en tanto que durante el proceso de molienda se consume una energía eléctrica de 90 a 130 Kwh/t de cemento. Según Huete (2000), la producción de cemento en España consume 0,6% de toda la energía que se utiliza en el país.

1.1.1.3. Emisiones

Las principales emisiones se producen durante el proceso de calcinación de las materias primas para la obtención del clinker y están dadas por dos actividades fundamentales: la quema de los materiales usados como combustibles y las reacciones químicas que se producen durante la formación de los componentes del clinker.

Los principales contaminantes que se emiten en este proceso, reconocido por la literatura técnica y de acuerdo con las regulaciones de la comunidad europea, son:

- Óxidos de nitrógeno (NO_x) y otros compuestos nitrogenados: entre 0,4 kg y 6 kg de óxido de nitrógeno por tonelada de clinker.
- Dióxido de azufre (SO_2) y otros compuestos sulfurosos: entre 0,02 kg y 7 kg de óxidos de azufre por tonelada de clinker.
- Dióxido de carbono (CO_2): entre 800 kg y 1.040 kg de dióxido de carbono por tonelada de clinker.
- Partículas
- Otras emisiones de compuestos orgánicos volátiles, metales y sus compuestos, así como dioxinas y furanos.

1.1.2. Agregados

No existen datos precisos de la producción de agregados a nivel mundial, como tampoco existen cifras sobre la elaboración de concreto. Para determinar en qué orden estarían esas cifras, se pueden hacer unas suposiciones, que podrían estar más o menos alejadas de la realidad, pero que darían una idea de la misma. Si se supone, lo cual no es exactamente así, que todo el cemento que se produce en el mundo es para hacer concreto y partimos de que, aproximadamente, se requieren $0,8 \text{ m}^3$ de piedra y $0,5 \text{ m}^3$ de arena por m^3 de concreto, los 3.830 millones de toneladas de cemento que se producen anualmente requerirían cerca de 29.499 millones de toneladas de agregados y producirían alrededor de 36.975 millones toneladas de concreto.

Otros impactos importantes que provoca la producción de agregados están asociados a la extracción en canteras, la trituración en planta y el transporte. En estos procesos se generan:

- Consumo energético: los equipos de extracción, las plantas trituradoras y los vehículos de transporte consumen mucha energía tanto eléctrica como de combustibles fósiles.
- Emisión de partículas: las canteras y procesadoras de agregados suelen producir mucha contaminación en sus alrededores debido a la gran cantidad de partículas de polvo que emiten.
- Hidrocarburos volátiles: los vehículos de transporte de materias primas y agregados se caracterizan por emitir grandes cantidades de hidrocarburos volátiles, producto de la quema de los combustibles en sus motores.
- Destrucción de la capa vegetal: para explotar una zona con rocas apropiadas en la producción de agregados, normalmente se necesita retirar primeramente la capa vegetal para dejar al descubierto la roca.

1.1.3. Agua

Con el mismo nivel de imprecisión para las estimaciones, se puede suponer que se requieren alrededor de 200 litros de agua para el mezclado de 1 m^3 de concreto. Entonces, se puede estimar que para producir esos 29.499 millones toneladas de concreto se requieren 2.611 millones de m^3 de agua de constitución. A estos hay que añadir que para el curado se consumen entre 15 y 50 litros de agua por m^2 de superficie de concreto. Igualmente, gran cantidad de agua se consume para la limpieza de las herramientas. En este caso, además, se impacta el ambiente por el hecho de que normalmente esa agua no solo se gasta, sino que se contamina, en primer orden, con cemento, y normalmente se vierte en el subsuelo generando importantes focos de contaminación. Una cifra que se puede manejar es que para la limpieza de un camión trompo se requieren alrededor de $2,25 \text{ m}^3$ de agua por camión por día.

1.2. Avances tecnológicos en la elaboración de concreto en el mundo

Existe una fuerte tendencia internacional hacia el desarrollo de nuevas tecnologías asociadas a la elaboración y uso del concreto. Como consecuencia, se han experimentado cambios trascendentales en las propiedades del material. En este trabajo se recoge una síntesis de algunos de los adelantos más importantes que se han logrado o están en desarrollo. En este caso se reseñan experiencias relacionadas con la utilización de aditivos superplastificantes, combinados con adiciones puzolánicas, y avances en la aplicación de la nanotecnología en el concreto.

1.2.1. Utilización de aditivos superplastificantes combinados con adiciones puzolánicas

Los aditivos plastificantes tienen más de un siglo de existencia, pero fue a mediados del siglo XX que se comenzaron a utilizar de forma masiva en la elaboración de concreto para la construcción. A partir de aquí comenzaron a desarrollarse nuevas variantes que mejoraron gradualmente su efectividad, hasta lograrse décadas después generaciones de plastificantes de muy alto rango a los que se les llamó superplastificantes. Al día de hoy se sigue mejorando el desempeño de estos aditivos, con lo cual se ha podido reducir drásticamente la cantidad de agua necesaria para el amasado del concreto.

A finales de los años sesenta aparecieron superplastificantes de corta vida a base de sulfonatos de naftaleno y sulfonatos de melamina. Luego, en los ochenta, surgieron superplastificantes de larga vida producidos con sales de ácido carboxílico, amidas y anhídrido carboxílico, así como el policarboxilato. Hoy abundan superfluidificantes de larga vida a base de naftaleno y polímeros de sulfonato melamina.

La Ley de Abrams establece que la resistencia a compresión del concreto es inversamente proporcional a la relación agua/cemento (a/c) empleada en su dosificación. Como consecuencia, la reducción de la relación a/c que se ha podido lograr con la incorporación de aditivos superplastificantes, ha permitido incrementar considerablemente la resistencia a compresión del concreto. Con esto se ha extendiendo su uso a aplicaciones mucho más exigentes desde el punto de vista estructural.

Por otro lado, igualmente, en las últimas décadas han aparecido algunos desechos de otras producciones que poseen propiedades puzolánicas. Esto significa que al añadirse al concreto reaccionan con la cal que se origina durante las reacciones de hidratación del cemento, para formar compuestos cementantes que aportan resistencias mecánicas adicionales al material.

La incorporación combinada de aditivos superplastificantes y adiciones puzolánicas ha provocado mejoras notables en algunas de las principales propiedades del concreto. El resultado es que en la actualidad se han desarrollado nuevas variantes de concreto, entre las que destacan:

- Concreto de alta resistencia
- Concreto de alto desempeño
- Concreto autocompactante

1.2.1.1. Concreto de alta resistencia

En concretos ordinarios la relación a/c suele rondar el valor de 0,50 y a veces es mucho mayor. Rara vez se utilizan relaciones a/c inferiores a 0,40. En estas condiciones, utilizando cemento Portland ordinario, resulta difícil lograr valores de resistencia a compresión superiores a 450 kg/cm^2 .

La mejora gradual en el desempeño de los aditivos plastificantes ha llevado al surgimiento de una nueva generación de estos, llamados superplastificantes. Su utilización ha permitido reducir drásticamente la relación agua/cemento en la mezcla a valores inferiores a 0,30, con el consecuente incremento de la resistencia a compresión del concreto. Utilizando una combinación de adiciones puzolánicas con aditivos superplastificantes se han logrado en obra concretos con resistencias a compresión cercanos a 1.000 kg/cm^2 . Al nivel de laboratorio los avances son aún mayores.

Las Torres Petronas en Kuala Lumpur, Malasia, con una altura de 452 m, culminadas en 1998, fueron los primeros edificios más altos del mundo hecho con estructura de concreto.

Hasta ese momento los grandes rascacielos se construían con estructura de acero debido a la baja resistencia mecánica del concreto.

El Burj (torre) Khalifa en Dubai, es actualmente el edificio más alto del mundo, con una altura de 828 m y sus columnas son de concreto con resistencia a compresión de 970 kg/cm² (Aldred, 2012).

1.2.1.2. Concreto de alto desempeño

El concreto de alto desempeño es un término que se utiliza mucho en la actualidad entre los investigadores del concreto, quienes lo han definido e interpretado de maneras diferentes. Sin embargo, en general se trata de concretos donde se combinan muy buena trabajabilidad, alta resistencia y gran durabilidad. Sin entrar en discrepancias con otros autores, para este trabajo lo definimos de la siguiente manera:

“Se considerará concreto de alto desempeño aquel que en términos generales supere al concreto tradicional en propiedades esenciales como la trabajabilidad en el estado fresco y la resistencia mecánica y la durabilidad en el estado endurecido. El uso específico que tendrá el concreto determinará el nivel de exigencia en cada una de estas o la consideración de otras propiedades”.

Como se mencionó en el punto anterior, la combinación de superplastificantes y puzolanas mejora considerablemente la resistencia mecánica. El superplastificante tiene un efecto muy positivo en la trabajabilidad, en tanto que las puzolanas permiten reducir la cantidad de cemento, lo cual contribuye a disminuir la retracción y el calor de hidratación del concreto y con esto su impermeabilidad y, como consecuencia, su durabilidad.

El puente Confederación en Canadá, construido en 1997 con una longitud de 12,9 km, se construyó con un concreto de alto desempeño que combinó una resistencia a compresión de 830 kg/cm², con un asentamiento de 20 cm. La dosificación utilizada por m³ de concreto incluyó 450 kg de cemento más puzolana (microsílice), 153 l de agua, 3 l de superplastificante y 160 ml de agente inclusor de aire (Metha, 2000).

1.2.1.3. Concreto autocompactante

Los aditivos superplastificantes permiten producir mezclas de concreto muy fluidas sin que se produzcan segregaciones. Esto permite utilizarlo en casos donde la compactación es complicada por razones del volumen o la forma del molde y del refuerzo de acero. Este es el caso de los anclajes del puente Akashi Kaikyo en Japón, construido en 1998, donde en cada uno se vertieron 290.000 m³ de concreto con un aditivo superplastificante y, además, 150 kg/m³ de polvo de roca caliza (Metha, 2000).

1.2.2. Aplicación de la nanotecnología en el concreto

Como en muchas áreas de la ciencia y la tecnología, en el área de la construcción y en particular en la tecnología del concreto, se están desarrollando nuevas y prometedoras aplicaciones de la nanotecnología.

En esta ponencia se muestran tres avances tecnológicos basados en la aplicación de la nanotecnología a la producción de concreto, a partir de la incorporación de partículas extrafinas en la mezcla en estado fresco. Entre otras experiencias se ha trabajado en: la incorporación de adiciones minerales activas extrafinas como la nanosílice, que mejoran las principales propiedades del concreto, la utilización de nanotubos de carbono como refuerzo

del concreto, que aumentan su resistencia y disminuyen la fisuración, así como nanopartículas funcionales incorporadas al cemento, que destruyen contaminantes atmosféricos o que permiten al concreto autorrepararse ante la aparición de fisuras.

1.2.2.1. Adiciones minerales activas extrafinas

La microsílíce es la adición puzolánica más efectiva de todas las investigadas hasta el momento. Esto se debe principalmente a que poseen más de 90% de pureza en cuanto a la cantidad de sílice presente en la misma, mayormente en estado amorfo y, además, a la enorme finura que se puede lograr en su proceso de obtención.

Sin embargo, mediante procesos nanotecnológicos esa finura puede incrementarse mucho más, hasta tamaños de granos de unas decenas de nanómetros, transformándose en nanosílíce.

Utilizando nanosílíce se han logrado mejoras notables en el concreto, como las siguientes (IMCYC, 2010):

- Concreto con altas resistencias iniciales y finales (se han logrado resistencias de 75 MPa a 1 día, 90 MPa a 28 días y 120 MPa a 120 días).
- Concreto con alta trabajabilidad (admite relaciones agua/cemento de 0,20 sin necesidad de superplastificantes).
- Alta impermeabilidad.
- Menor costo por obra comparado con la suma de microsílíce y superplastificante (9 kg de nanosílíce sustituyen a 70 kg de microsílíce más superplastificante).

1.2.2.2. Nanotubos de carbono

Los "nanotubos de carbono" son el material más fuerte conocido por el hombre. Mientras un cable de acero de alta resistencia de 0,56 milímetros de espesor puede soportar un peso de, aproximadamente, 102 kg, un cable de nanotubos del mismo grosor puede soportar un peso de hasta 15,3 toneladas. Se consideran 100 veces más fuertes y resistentes que el acero y su peso es 1/6 del peso de este. Además, conducen la electricidad mejor que el cobre y son buenos conductores de calor. Actualmente, la mayoría de los estudios de nanotecnología se enfoca en estos nanotubos (Duchitanga, 2012).

El efecto físico del reforzamiento del concreto con nanotubos de carbono consiste en impedir la propagación de las grietas propias del proceso de elaboración. La adición de nanotubos mejora la calidad de las nanoestructuras de la pasta de cemento en las zonas de transición (entre la pasta de cemento y los agregados) y en el resto de la pasta de cemento. Con esto se aumenta la resistencia a tracción y se reduce la fisuración. Según Ladeira y otros (2016), al añadir al cemento 0,3% de nanotubos de carbono, se incrementa la resistencia a compresión del concreto en 7,3%, en tanto que para 0,2% de adición de nanotubos de carbono la resistencia a tracción se eleva en 39,1%.

1.2.2.3. Nanopartículas funcionales

Actualmente se encuentra en desarrollo una variedad de partículas nanoestructuradas que añadidas a la mezcla de concreto le aportan propiedades que lo convierten en un material mucho más útil y atractivo. Se distinguen y muestran aquí, en primer lugar, las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), que actúan como catalizadores, acelerando la destrucción natural

de contaminantes atmosféricos, a la vez que aporta a las superficies de concreto un efecto autolimpiante. En segundo lugar se presentan dos formas de aportar propiedades de autorregeneración al concreto agrietado: las microcápsulas de silicato de sodio (Na_2SiO_3) y las bacterias reparadoras de grietas.

1.2.2.3.1. Dióxido de titanio

El dióxido de titanio (TiO_2) es una de las sustancias químicas más blancas que existen. Refleja prácticamente toda la radiación visible que le llega y mantiene su color pase lo que pase cuando otros compuestos se decoloran con la luz. Se encuentra en la naturaleza en varias formas: rutilo (tetragonal), anatasa (octaédrico) y brookita (ortorrómbico).

El TiO_2 es un semiconductor que actúa como fotocatalizador de las reacciones de oxidación y reducción de las sustancias contaminantes del aire. La fotocatalisis, gracias a la energía procedente de la luz, descompone más rápidamente los agentes contaminantes y acelera unos procesos de oxidación que en la naturaleza tendrían lugar de una forma muy lenta. Así, los NO_x se transforman en NO_3 , los SO_x en SO_4 y los COV en CO_3 .

Las reacciones de oxidación-reducción iniciadas por la fotocatalisis transforman los óxidos de nitrógeno en sales de nitrato de calcio y los contaminantes volátiles orgánicos (como las fases aromáticas de los hidrocarburos, las dioxinas, etc.) en agua y dióxido de carbono. Los iones NO_3 , CO_3 y SO_4 , así como las sales $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, CaCO_3 y CaSO_4 son fácilmente arrastrados por el agua de lluvia hacia el suelo.

Actualmente se han desarrollado aplicaciones de este material en varios países, siendo pionera en esto la empresa italiana Italcementi. Se ha utilizado en edificaciones y en pavimentos.

Algunas investigaciones han tratado de cuantificar el efecto en la contaminación de la utilización del material:

- En una ciudad como Madrid, con 2.500 horas de sol al año, una fachada de 1.000 m² descontaminaría el NO_x generado por unos 150 coches de gasolina al año, declaró Mariana Díez, directora de Marketing del área de cementos de Lafarge en España. (UNOI, 2012).
- Experimentos muestran que 1.000 metros cuadrados de superficie fotocatalítica son capaces de limpiar un volumen de aire de 200.000 metros cúbicos cada 10 horas de irradiación (Israel, 2005).
- En ensayos de laboratorio efectuados en el Instituto de Tecnología Química de la UPV (España), un mortero alcanza una actividad de eliminación de NO de 18 mg/m²/h.

Desde el punto de vista económico, hay que reconocer que los concretos fotocatalíticos elaborados por la empresa Italcementi son entre 9 y 12 veces más caros que el concreto ordinario. Sin embargo, se colocan en obra en delgadas capas de pocos milímetros de espesor. En las obras que han construido nunca sobrepasan del 15% del total del concreto utilizado (Israel, 2005).

1.2.2.3.2. Microcápsulas de silicato de sodio (Na_2SiO_3)

El concreto no es un material homogéneo y es frecuente que se encuentren numerosas grietas en su masa debido a efectos del proceso de elaboración o durante su uso. Nuevas investigaciones han desarrollado un concreto capaz de autorrepararse de esos daños.

Michelle Pelletier, de la Universidad de Rhode Island, ha probado la incorporación de microcápsulas de silicato de sodio (Na_2SiO_3) en la mezcla de concreto para reparar grietas. Al producirse algún tipo de fisura en la masa de concreto, la cápsula se rompe y el silicato de sodio entra en contacto con el hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, generado durante la hidratación del cemento. Se produce una reacción química que da lugar a una sustancia gelatinosa que en, aproximadamente, una semana se endurece (Notario, 2010).

1.2.2.3.3. Bacterias reparadoras de grietas

Según CNN en Español (Stewart, 2015), el profesor holandés Henk Jonkers ideó añadir a la mezcla cápsulas de plástico biodegradable que contienen lactato de calcio y un tipo de bacterias, capaces de sobrevivir de forma inactiva durante décadas en un ambiente alcalino, duro y seco como es el concreto. Al producirse la fisura en el concreto, se rompe el plástico, el agua penetra y se activan las bacterias. Estas se alimentan del lactato de calcio, combinan el calcio con iones de carbono y forman carbonato de calcio, que es un mineral llamado calcita, el cual conforma la roca caliza.

1.3. Experiencia del Grupo de Concreto del IDEC

El Grupo de Concreto del IDEC, desde su condición de investigadores de una institución académica, se ha planteado contribuir a la reducción del impacto ambiental de la construcción con una serie de investigaciones, entre las que destacan las siguientes:

1.3.1. Sustitución de cemento por materiales puzolánicos

Si el cemento representa el material que mayor impacto genera sobre el ambiente, además de lo que se pueda lograr por reducir el consumo de concreto en general, se debe y existen notables posibilidades de reducir la cantidad de cemento a colocar dentro del concreto. La vía más importante que se explora en estos momentos para disminuir el consumo de cemento es las adiciones puzolánicas.

En el IDEC hemos estudiado las cenizas de algunos residuos agrícolas con capacidad puzolánica, entre las que destaca la cascarilla de arroz (figura 1), que permite sustituir hasta 25% de cemento por ceniza, sin afectar, o incluso mejorando algunas de sus principales propiedades.



Figura 1: Ceniza de cascarilla de arroz a la salida del horno. (Elaboración propia).

La figura 2 muestra el comportamiento a compresión de mezclas elaboradas con diferentes proporciones de cemento Portland ordinario (CPO) y ceniza de cascarilla de arroz (CCA), así como algunas combinaciones de CCA con cal. Los resultados muestran un incremento en la resistencia a compresión en la medida en que se incrementa el porcentaje de sustitución de cemento por cenizas hasta 20%, que es el óptimo a partir del cual comienzan a disminuir los valores de resistencia.

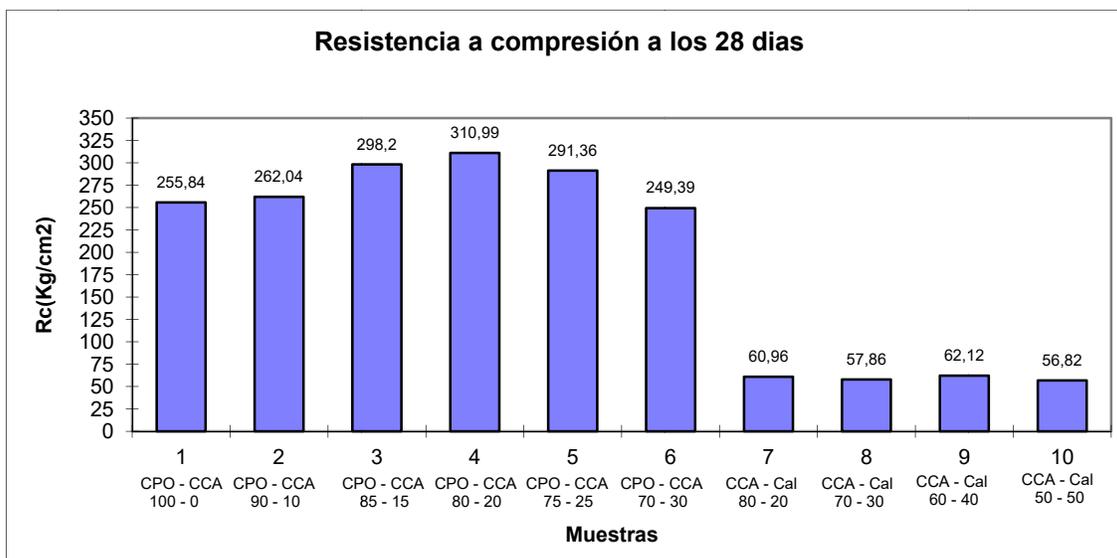


Figura 2: Resultado del ensayo de resistencia a compresión de materiales puzolánicos. (Elaboración propia)

1.3.2. Sustitución del acero de refuerzo por materiales alternativos no metálicos

La producción del acero, utilizado como refuerzo en el concreto armado, produce también un importante impacto sobre el ambiente, sobre todo en el consumo de materias primas y de

recursos energéticos. Existen numerosos materiales que con mayor o menor eficacia se estudian para aportar al concreto las propiedades que le proporciona el acero. Se han utilizado, tanto elementos alargados en forma de barra, en plástico, fibra de vidrio, etc. como pequeñas fibras de plástico o vegetales. Una de las alternativas más reconocidas constituye la utilización de fibras de sisal, un producto vegetal renovable y que se puede cultivar convenientemente.

En la investigación realizada como trabajo de grado, por la arquitecta Yuraima Centeno, bajo la tutoría de la arquitecta Milena Sosa y de este autor, se desarrolló una propuesta de paneles prefabricados de concreto reforzado con fibras cortas de sisal para su uso como cerramiento de viviendas (figura 3).



Figura 3: Probeta de mortero reforzado con fibras de sisal ensayado a la flexión.

El trabajo demuestra cómo el comportamiento del concreto a la flexión y su ductilidad mejoran con la colocación de fibras repartidas en su masa. La figura 4 muestra el comportamiento a la flexión de una probeta de mortero simple (sin fibras), apreciándose una carga de rotura a la flexión promedio de alrededor de 1.200 kg, con un fallo brusco o frágil, para valores de deformación máximos de 1 mm, aproximadamente.

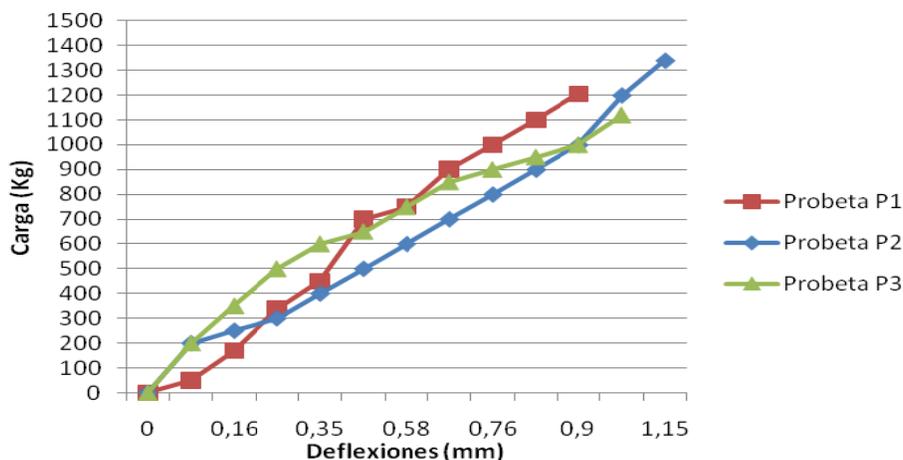


Figura 4: Resultados del ensayo de flexión de muestra de mortero simple. Elaborado por Yuraima Centeno.

La figura 5, en cambio, muestra el comportamiento de una muestra de concreto reforzado con fibras, donde la carga de rotura promedio alcanza los 2.000 kg, aproximadamente, con una deformación máxima de 3 mm, ambos superiores a la muestra patrón y sobre todo con un tipo de fallo dúctil, lo cual es muy deseable en este tipo de componentes.

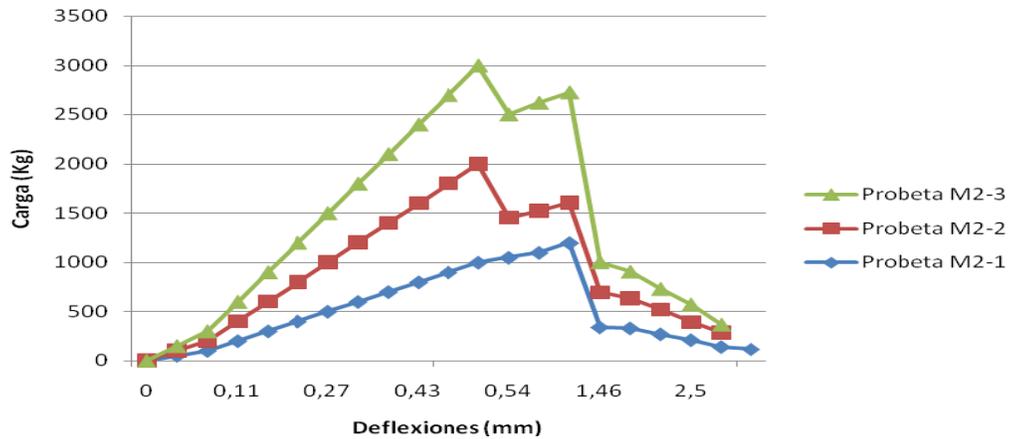


Figura 5: Resultados del ensayo de flexión de muestra de mortero reforzado con fibras. Elaborado por Yuraima Centeno

Otro ejemplo lo constituye el Trabajo de Grado de la arquitecta Solángel Mejías bajo la tutoría de este autor, en el cual se propone la elaboración de un tipo de ferrocemento, donde las mallas de refuerzo que se utilicen no sean de acero, sino de plástico, aumentando aún más el carácter sostenible de este material (figura 6).



Figura 6: Figura 6: Panel de mortero reforzado con mallas de plástico. Fotografía tomada por Solángel Mejía

1.3.3. Agregados reciclados

En el Trabajo de Grado de Maestría del ingeniero Reyes Báez, tutorizado por este autor, se utilizaron escombros de concreto recolectados en un vertedero ubicado en la carretera nacional Troncal 9, km 4, del tramo Guanta-Cumaná en el estado Anzoátegui, para estudiar sus posibilidades de utilizarlo en la producción de agregados. Los escombros incluyen fragmentos de concreto, bloques de arcilla, bloques de concreto, mortero de friso y otros residuos orgánicos, metálicos, etc. Los escombros fueron sometidos a un proceso experimental de transformación para convertirlos en agregados, que incluyó:

- Toma de muestras selectiva según los diferentes tipos de escombros.
- Tratamiento previo que incluye una trituración y homogeneización manual, a fin de uniformar las partículas de residuos a un tamaño no mayor a 4", coincidiendo con el tamaño de la abertura de la tolva de entrada de material a la trituradora.
- Trituración que se realiza utilizando una trituradora de mandíbulas, moliendo cada tipo de escombro por separado.
- Cribado mediante el cual el material resultante de la trituración se tamiza a través de una criba N° 4, a fin de separar la fracción fina de la fracción gruesa.

A los agregados obtenidos se les hace una caracterización fisicoquímica que incluye: observación visual de la morfología, análisis granulométrico, peso unitario, impurezas orgánicas, densidad, absorción y análisis químico.

En espera de ensayos posteriores que se harán a mezclas de concreto, la caracterización fisicoquímica realizada hasta el momento, permite concluir que los agregados obtenidos son aptos para utilizarse en concretos no estructurales, sin embargo, combinados con agregados naturales podrían sustituir parcialmente a estos para producir concreto estructural.

1.3.4. Concreto de alta resistencia

Si bien el uso del concreto de alta resistencia en el mundo ha estado dirigido a la construcción de edificaciones de gran altura, por las grandes cargas a que están sometidas sus columnas, es posible también utilizarlo en edificaciones más bajas, donde se podrían lograr secciones más racionalizadas de sus elementos estructurales. La tesis doctoral de la arquitecta Solángel Mejías se propone desarrollar un concreto con una resistencia a compresión superior a 700 kg/cm². Para lograrlo se adicionan al concreto un superplastificante y una puzolana. El superplastificante es policarboxilato y la puzolana es microsílíce. El objetivo es utilizar el material en edificaciones de baja altura, logrando elementos estructurales con secciones pequeñas y formas racionalizadas.

Los primeros ensayos a probetas cúbicas de mortero arrojaron valores de resistencia a compresión cercanos a 800 kg/cm² a los 28 días, muy superiores a la muestra patrón sin adiciones (figura 7).

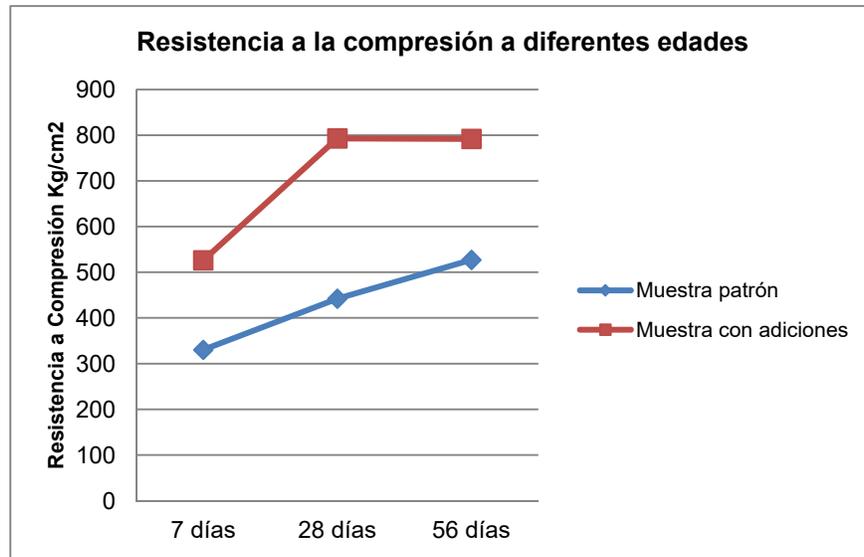


Figura 7: Ensayo de resistencia a compresión. Elaborado por Solángel Mejías

2. CONCLUSIONES

Sin dudas la producción y uso del concreto genera un impacto importante sobre el medio ambiente. Esto se debe fundamentalmente a los volúmenes tan grandes de materias primas que consume, el elevado consumo energético, la contaminación ambiental que genera por sus emisiones y la cantidad de escombros que produce al final de su vida útil.

Debido a esto, a nivel mundial se adelantan numerosas investigaciones que hacen cada vez más ecológico el uso de este material. El concreto, con propiedades muy mejoradas respecto al tradicional, así como la aplicación de la nanotecnología, aparece entre los principales avances que se han logrado.

En el IDEC, en particular, se trabaja en la misma dirección y en los últimos tiempos se han desarrollado aportes en el ahorro de cemento y de agregados, sustitución de acero de refuerzo, a la vez que se trabaja también en concretos de alta resistencia como vía para disminuir el consumo de materiales.

3. REFERENCIAS

Aldred, J. (2012). El concreto en las grandes alturas. *Revista digital Noticreto*, n° 110, enero/febrero.

Cachan, A. (2001). Cementos. Encuentro Medioambiental Almeriense: En busca de soluciones. Andalucía.

Duchitanga, J. (2012). Nanotecnología en la construcción. Extraído el 12 de julio de 2016 de: <http://www.monografias.com/trabajos90/nanotecnologia-construccion/nanotecnologia-construccion.shtml>.

Huete, R. (2000). Aproximación a un proyecto de construcción sostenible. Curso de ampliación de conocimientos "La sostenibilidad de la construcción", Caracas, UCV.

IMCYC (2010). Nanoaditivos para el concreto. *Construcción y Tecnología*, octubre, México.

Index Mundi (2013). Cemento hidráulico: producción mundial, por país. Extraído el 29 de junio de 2016 de: http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/cement/cement_t22.html.

Israel, E. (2005). Desarrollan en Italia un cemento antismog. Extraído el 30 de junio de 2016 de: <https://reforma.vlex.com.mx/vid/desarrollan-italia-cemento-antismog-193868975>.

Ladeira, L., Calixto, J.M., Ladeira, L.O., De Souza, T.C. y Dias, A.E. (2016). Resistência mecânica de argamassas de cimento Portland fabricado com nanotubos de carbono. *IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*. Río de Janeiro.

Metha, P.K. (2000). Avances en la tecnología del concreto. *Revista Construcción y Tecnología*, octubre, México.

Notario, E. (2010). Desarrollan un hormigón inteligente capaz de autorrepararse. Extraído el 2 de mayo de 2016 de: <https://hipertextual.com/2010/05/desarrollan-un-hormigon-inteligente-capaz-de-autoreparase>.

Stewart, A. (2015). Profesor holandés crea un concreto vivo que se repara a sí mismo. Extraído el 29 de junio de 2016 de: <http://cnnespanol.cnn.com/2015/05/15/profesor-holandes-crea-un-concreto-vivo-que-se-repara-a-si-mismo>.

UNOI (2012). Mortero foto catalítico. Tomado el 29 de junio de 2016 de: <http://enclave.cev.es/unoi/mortero-foto-catalitico/>.

ÍNDICE DE AUTORES

- Águila, Idalberto [TC-05]
 Alezard, Erika [CS-11]
 Bolívar, Zulma [CS-09] [CS-18]
 Capra Ribeiro, Fabio [CS-06] [CS-07]
 Caricatto, Javier [TPA-10]
 Casique Torres, Jorge Luis [AS-02]
 Castellano, César [AS-07]
 Cedres, Sonia [TPA-03]
 Chacón, José Luis [TPA-07]
 Chávez, Moisés [HP-01]
 Collell Schnaidt, María Eugenia [CS-10]
 Criollo, Cruz [CS-18]
 D'Hers Del Pozo, Manuel [CS-01]
 Dávila, Yunitza [CS-18]
 Delgado-Linero, Manuel Gerardo [CS-13]
 Díaz, Heidelyn [HP-13]
 Fato Osorio, Ana Elisa [HP-06]
 Fermín, Ramón [TPA-09]
 Ferrer y Arroyo, Mercedes [AS-03]
 García Alcaraz, Teresa [CS-04]
 Gómez, Nersa, [AS-03]
 González Casas, Lorenzo [HP-03]
 González Herrera, María Zuleny [IRG-01] [IRG-02]
 González, Alejandra [TC-04]
 Hernández, Beatriz [AS-01] [AS-05]
 Hernández, Beverly [AS-05] [TC-03]
 Hernández, María Elena [TPA-11]
 Higuera, Ester [AS-03]
 Lameda Luna, Hernán [HP-08]
 Landa, Izaskun [HP-07] [HP-14]
 Loges, Sigfrido [TC-02]
 López, Pedro [HP-04]
 Machado Gámez, Rafael Juan [CS-16]
 Marín Castañeda, Orlando [HP-03]
 Marinilli, Angelo [TC-01]
 Márquez Guerra, Paveyn [CS-20]
 Mena, Aliz [CS-05]
 Mendoza Andrade, Yelitza [CS-15]
 Meza Suinaga, Beatriz [HP-02]
 Millano, Ismar [HP-04]
 Montilla, Ángel Domingo [TPA-04]
 Moreno Troconis, Viviana [CS-03]
 Morúa, Argentina [CS-17]
 Naranjo, Nathalie [CS-12]
 Olaizola, Carlos [TPA-02]
 Padrón Chacón, Carlos [AS-04]
 Peña, María Isabel [CS-19]
 Pérez Gallego, Francisco [HP-10] [HP-11] [HP-12]
 Pérez Valecillos, Tomás [AS-07]
 Polito, Luis [TPA-06]
 Prato Vicuña, Ramiro [CS-02]
 Ramírez, Eliana [AS-05]
 Rangel G, Yoisy C. [AS-01]
 Rauseo, Newton [CS-08]
 Rivero, Blanca [HP-09]
 Suarez Acosta, Javier [HP-05]
 Tavera, Cristhian [CS-09]
 Torres Mier y Terán, Hilda [CS-14]
 Urdaneta Troconis, Carlos [AS-06]
 Urdaneta Troconis, Carlos [CS-09]
 Vásquez-Ortega, Manuel [TPA-05]
 Vera Paparoni, María [TPA-08]
 Villalobos, Eugenia [AS-01] [TPA-01]
 Yacot, Isabel [CS-06]





Este libro de Memorias de la Trienal FAU 2017 se terminó de editar en la ciudad de Caracas, entre los meses de diciembre de 2017 y enero de 2018.

Para su composición se usaron familias y subfamilias de las fuentes tipográficas Futura y Arial; se diagramó en páginas de tamaño carta.

El imagotipo de la FAU.UCV fue diseñado por Eduardo López y Lucas García (Metaplug, 2004). El de la Trienal FAU, por Pedro Luis Hippolyte (Ediciones FAU UCV, 2011).

Se realizó completa y exclusivamente en versión digital, de libre acceso y disponible para descarga gratuita desde los portales digitales de la [FAU UCV](#) y de [Saber UCV](#)

