

Escuela de
Construcción

CONSTRUCCIÓN: TEMAS Y REFLEXIONES

JUAN PABLO DUQUE CAÑAS
EDITOR ACADÉMICO

Construcción: temas y reflexiones

Construcción: temas y reflexiones

Henry H. Carvajal Jaramillo, Mónica Montoya Vélez,
Juan Carlos Ochoa Botero, Carlos Mauricio Bedoya Montoya,
Edgar Adolfo Cano Restrepo, Carlos Andrés Rúa Machado,
Juan Enrique Torres Madrigal

Juan Pablo Duque Cañas
Editor académico



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
Medellín 2022

Construcción: temas y reflexiones

© Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín
Facultad de Arquitectura
Escuela de Construcción

© Henry H. Carvajal Jaramillo, Mónica Montoya Vélez,
Juan Carlos Ochoa Botero, Carlos Mauricio Bedoya Montoya,
Edgar Adolfo Cano Restrepo, Carlos Andrés Rúa Machado,
Juan Enrique Torres Madrigal (autores)

Editor académico: Juan Pablo Duque Cañas

Primera edición, agosto de 2022
ISBN impreso: 978-958-794-943-8
ISBN digital: 978-958-794-944-5

Edición
Sección de Publicaciones Sede Medellín
cenpubli_med@unal.edu.co
Diseño de cubierta: Rodrigo Lenis León
Diagramación: María Piedad León Cáceres
Corrección de textos: Felipe Restrepo David

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

690.71

C17

Carvajal Jaramillo, Henry H.

Construcción : temas y reflexiones / Henry H. Carvajal Jaramillo [y otros seis] ; editor Juan Pablo Duque Cañas. -- Primera edición. -- Medellín : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Arquitectura. Escuela de Construcción, 2022.

1 recurso en línea (202 páginas) : ilustraciones.

ISBN : 978-958-794-944-5

1. CONSTRUCCIÓN – FORMACION PROFESIONAL. 2. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (SEDE MEDELLÍN). FACULTAD DE ARQUITECTURA. ESCUELA DE CONSTRUCCIÓN. 3. CONSTRUCCIÓN – ENSEÑANZA. 4. INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – ADMINISTRACIÓN. 5. CONSTRUCCIÓN - INNOVACIONES TECNOLÓGICAS. 6. EDIFICIOS SOSTENIBLES. I. Montoya Vélez, Mónica. II. Ochoa Botero, Juan Carlos. III. Bedoya Montoya, Carlos Mauricio. IV. Cano Restrepo, Edgar Adolfo. V. Rúa Machado, Carlos Andrés. VI. Torres Madrigal, Juan Enrique. VII. Duque Cañas, Juan Pablo, editor. VIII. Título

Catalogación en la publicación Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín

Tabla de contenido

CAPÍTULO

PÁGINA

9	Cruzando miradas desde y hacia la construcción <i>Juan Pablo Duque Cañas</i>
1 13	La tecnología en la arquitectura y la construcción arquitectónica: hacia una conceptualización. Reflexiones <i>Henry H. Carvajal Jaramillo</i> <i>Mónica Montoya Vélez</i> <i>Juan Carlos Ochoa Botero</i>
2 51	La tecnología en la arquitectura. Un método para el conocimiento de la edificación histórica <i>Henry H. Carvajal Jaramillo</i>
3 91	Coser el concreto. Técnica y tecnología del concreto reforzado con fibras vegetales <i>Juan Carlos Ochoa Botero</i>
4 121	La construcción sostenible –reflexiva–: un camino posible <i>Carlos Mauricio Bedoya Montoya</i> <i>Edgar Adolfo Cano Restrepo</i>
5 135	Gestión de la construcción para una era digital. Tecnología, transformación y cooperación como retos del ejercicio pedagógico en la gestión del diseño y la construcción de edificios <i>Carlos Andrés Rúa Machado</i>

CAPITULO

PÁGINA

6	Iluminación artificial en Colombia
173	y la participación de la Universidad Nacional de Colombia
	<i>Juan Enrique Torres Madrigal</i>
197	Lista de figuras y tablas
199	Índice temático

Autores

HENRY H. CARVAJAL JARAMILLO

Arquitecto constructor (Universidad Nacional de Colombia). Especialista en Patología de la Construcción (Universidad Santo Tomás) Máster Universitario en Tecnología de la Arquitectura (Universidad Politécnica de Cataluña). Doctor en Tecnología de la Arquitectura, Edificación y Urbanismo (Universidad Politécnica de Cataluña). Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia.

MÓNICA MONTOYA VÉLEZ

Ingeniera civil. Magíster en Administración. Estudiante de Doctorado de Ingeniería. Profesora Facultad de Arquitectura.

JUAN CARLOS OCHOA BOTERO

Arquitecto constructor (Universidad Nacional de Colombia). Magíster en Administración (Universidad Eafit). Doctor en Ingeniería de la Construcción y Gestión Ambiental (Universidad Politécnica de Valencia). Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia

CARLOS MAURICIO BEDOYA MONTOYA

Arquitecto constructor (Universidad Nacional de Colombia). Magíster en Hábitat (Universidad Nacional de Colombia). Doctor en Proyectos (Universidad Internacional Iberoamericana - México). Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia.

EDGAR ADOLFO CANO RESTREPO

Arquitecto constructor (Universidad Nacional de Colombia). Especialista en Interventoría de Proyectos y Obras (Universidad Nacional de Colombia). Magíster en Construcción (Universidad Nacional de Colombia). Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia.

CARLOS ANDRÉS RÚA MACHADO

ArquitectoConstructor (Universidad Nacional de Colombia). Especialista en Gestión Empresarial (Universidad Nacional de Colombia). Magíster en Administración (Universidad Eafit). Candidatura a doctor en Ingeniería - Sistemas e Informática. Profesor Asistente de la Universidad Nacional de Colombia.

JUAN ENRIQUE TORRES MADRIGAL

Ingeniero electricista (Universidad Nacional de Colombia). Magíster en Construcción (Universidad Nacional de Colombia). Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia.

Cruzando miradas desde y hacia la construcción

El presente libro hace parte de una serie de publicaciones a través de las cuales la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, quiere hacer público lo que se discute en su interior cada día. Productos derivados del proyecto denominado “Temas y reflexiones de la Facultad de Arquitectura. ¿Para dónde vamos?”, acá están contenidos planteamientos de gran interés, no solo para quienes busquen formarse bajo el cobijo de esta institución académica, sino también para todo aquel que escudriñe buscando encontrar nuevos motivos de cavilación que le permitan una mayor comprensión del entorno que habita socialmente y de su propia condición como ciudadano.

En esta publicación se recogen algunos de los puntos de investigación que se desarrollan actualmente en la Escuela de Construcción, a partir de los cuales se evidencia una creciente preocupación por incorporar las diversas temáticas vinculadas a los sistemas constructivos con ámbitos como los de los estudios históricos y patrimoniales, hasta la muy urgente necesidad de establecer aclaraciones y contribuciones posibles y pertinentes ante la crisis medioambiental que hoy es, a todas luces, más grave que ayer.

El presente volumen se estructura a partir de las diversas facetas que involucran lo construido, mediante las cuales el lector que se aproxime a este libro percibirá que sus autores actúan responsablemente al alertar a la sociedad sobre puntos críticos que deben ser tenidos en cuenta, si de lo que se trata es de advertir sobre los riesgos que para la sociedad implica desconocer, entre otras cosas, que lo construido es no solamente el ámbito en el

que se establecen nuestros recuerdos, colectiva y frágilmente compartidos, sino también un factor de impacto prioritario cuyos peligros deben escudriñarse en búsqueda de nuevas posibilidades que nos permitan superar los graves problemas que el mismo espacio construido detona como resultado de equivocadas prácticas y concepciones.

Inicialmente, en el capítulo “La tecnología en la arquitectura y la construcción arquitectónica. Hacia una conceptualización. Reflexiones”, Henry Hernán Carvajal Jaramillo, Mónica Montoya Vélez (†) y Juan Carlos Ochoa Botero hacen una reflexión sobre las dificultades conceptuales que con frecuencia relacionan, no muy acertadamente, los sistemas constructivos con los procedimientos o los procesos de construcción, claridad necesaria a partir de la cual se fundamentan los ámbitos de la tecnología y la construcción arquitectónica.

Seguidamente, Henry Hernán Carvajal Jaramillo apunta, en el capítulo “La tecnología en la arquitectura. Un método para el conocimiento de la edificación histórica”, un aspecto que, podríamos indicar, profundiza los argumentos del anterior capítulo. Derivado de investigaciones desarrolladas por el autor acerca de aspectos tecnológicos de construcciones del periodo neogranadino de la historia nacional, este texto apunta a presentar las condiciones necesarias para configurar el análisis de las construcciones con la intención de afianzar su validez como fuente y objeto histórico.

Por otro lado, luego de hacer una revisión sobre las características de las fibras vegetales, y de las ventajas de su utilización en el concreto, se muestran estas como una opción favorable cuando se busca mejorar las propiedades de las mezclas, sumando además las favorabilidades de la sostenibilidad medioambiental, como lo concluye el capítulo presentado por Juan Carlos Ochoa Botero titulado “Coser el concreto. Técnica y tecnología del concreto reforzado con fibras vegetales”.

La necesidad de plantear la sostenibilidad como un ámbito necesario y probable en las dinámicas de la construcción es presentada por Carlos Mauricio Bedoya Montoya y Edgar Adolfo Cano Restrepo en “La construcción sostenible —reflexiva—: un camino posible”, escrito a partir del cual los autores apuntan el camino que consideran urgente dadas las

condiciones de crisis medioambiental que también incumben a nuestras regiones próximas.

En la misma ruta de reflexión sobre el futuro de la construcción tenemos el capítulo “Gestión de la construcción para una era digital. Tecnología, transformación y cooperación como retos del ejercicio pedagógico en la gestión del diseño y la construcción de edificios”, de Carlos Andrés Rúa Machado, quien hace aquí un válido llamado a mantener la capacidad de adaptación a nuevos retos y al poder de transformar estas nuevas problemáticas en oportunidades de desarrollo.

Finalmente, Juan Enrique Torres Madrigal nos presenta, en “Iluminación artificial en Colombia y participación de la Universidad Nacional de Colombia”, un estado de la situación actual de este importante ámbito de la arquitectura y de la construcción en el contexto nacional, enfatizando los retos que nos esperan en las próximas décadas en lo relacionado con la iluminación artificial y con la eficiencia energética.

En conclusión, esta publicación incita a reflexionar sobre las condiciones, las potencialidades y las responsabilidades inherentes al campo de la construcción, sin pasar por alto las advertencias necesarias para que nos preparemos para los nuevos retos que ya no son del futuro, sino del presente.

Estos textos, diversos por demás, pero evidentemente complementarios, dan cuenta de la complejidad y amplitud de las reflexiones que hacen parte del compromiso vocacional y existencial de los profesores de la Facultad de Arquitectura, esperando que logren el cometido fundamental de despertar el interés de los lectores y, esencialmente, de contribuir en la comprensión de las problemáticas que caracterizan y afectan a nuestra sociedad, responsabilidad fundamental de la Universidad Nacional de Colombia.

Es válido y necesario, finalmente, reconocer aquí la memoria de nuestra querida colega, la profesora Mónica Montoya Vélez, coautora de uno de los textos, quien falleció en el transcurso de este proyecto. Este libro es, en parte, también un homenaje a su memoria.

Juan Pablo Duque Cañas
Editor académico

Capítulo 1

La tecnología en la arquitectura y la construcción arquitectónica: hacia una conceptualización. Reflexiones

Henry H. Carvajal Jaramillo

Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia

Mónica Montoya Vélez

Profesora Asociada
Universidad Nacional de Colombia

Juan Carlos Ochoa Botero

Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia

INTRODUCCIÓN

Muchas veces se define la Construcción como esa actividad u oficio antiguísimo de materializar o ejecutar viviendas, fábricas, parques, vías, etc., o, lo que es lo mismo, los proyectos arquitectónicos o civiles necesarios para satisfacer las necesidades del ser humano. De hecho, está muy difundido, en algunos países, el término *construcción civil* y *construcción arquitectónica*, para referirse a la actividad de materializar los proyectos civiles o los proyectos arquitectónicos respectivamente. También se refieren a la *construcción* como ese sector de la economía relacionado con las obras arquitectónicas y civiles. Por tanto, cuando se habla de *constructor* o *construcción* en tanto profesión se entiende como ese profesional o profesión que se encarga de la ejecución de proyectos dentro del campo de la arquitectura y la ingeniería civil, sin olvidar que también intervienen ingenieros eléctricos, sanitarios y mecánicos para la ejecución de sus instalaciones, que en cuyo caso también se enmarca dentro de la actividad de la *construcción*.

El término *construcción*, según el Diccionario de la Lengua Española (Real Academia Española, 2001), viene del latín *constructio*, *-ōnis*, y se refiere a la “acción y efecto de construir”, “arte de construir” y “obra construida y edificada”. Esto quiere decir que la palabra tiene dos significados, o se puede utilizar de dos maneras diferentes, una tiene que ver con la acción de “construir”, y la otra, el objeto construido, es decir, el edificio de vivienda, comercio, industria o institucional, o la infraestructura, llámese vía, puente, parque, etc.

En gramática la palabra “construcción” está compuesta del verbo activo transitivo “construir” y del sufijo “ción” que indica efecto, hecho o acción de. Por tanto, se podría decir que cuando se habla de “efecto de”, se refiere al producto resultante de la acción de construir, lo cual sería el objeto construido. La Real Academia define “construir” como hacer una obra de arquitectura o ingeniería nueva, pero también dice que significa hacer algo utilizando los elementos adecuados, o a la formación adecuada de un enunciado en gramática, lo que quiere decir que este término no es propio de la arquitectura y la ingeniería civil, como se podría pensar; y en el lenguaje cotidiano así lo corroboramos. Es así como cobra mayor importancia hablar de *construcción arquitectónica* y *construcción civil*.

Por otro lado, el mismo diccionario de la Real Academia Española (2001) define “edificación” como la acción y efecto de edificar, pero se refiere específicamente a un edificio, mientras que “edil” lo relaciona con el encargado de las obras públicas, refiriéndose a los templos, las casas y las calles. Define “civil” a una obra que está destinada a un servicio público como carreteras, puentes o puertos. Por otro lado, la Real Academia define “edilicio” o “edilicia” como un término utilizado en algunos países de América, específicamente en Argentina, Bolivia, Paraguay, República Dominicana y Uruguay, perteneciente o relativo a las obras o actividades de carácter municipal, especialmente las relacionadas con la edificación, por lo que también se podría hablar de *construcción edilicia*, con el ánimo de usar un término equivalente a *construcción civil*.

Dicho esto, se podría deducir que el encargado de la materialización de las obras de infraestructura es el *constructor civil* o el *ingeniero civil*, y el encargado de materializar las obras de edificación es el *constructor edil*, pero para ser más actuales, ya que el término “edil” se utilizaba en la Antigua Roma, sería mejor el *constructor edilicio* o *de edificación*, o el *ingeniero edil* o *ingeniero de edificación*, como se le llama en algunos países.

Como se puede ver, solo el término *construcción* requiere y ha requerido de precisiones para ser usado en el ámbito académico, con el ánimo de “construir” y unificar un lenguaje propio en la subárea del conocimiento 58 - *arquitectura y construcción*, según la Unesco, donde se considera además de la “arquitectura estructural”, la “arquitectura paisajística” y la ingeniería civil, la *edificación* y la *construcción*. Es así como se hace

necesario esta reflexión alrededor de una terminología que poco o nada se ha tratado, ya que se ha considerado inserta dentro de los campos amplios de la arquitectura y la ingeniería civil. Adicionalmente a esto, es preciso definir términos como “tecnología de la arquitectura, tecnologías de constitución, tecnologías de producción, tecnologías de intervención, sistema constructivo, sistema de construcción, proceso constructivo, componentes, materiales, diseño de ejecución, prefiguración de la construcción y planificación de la construcción”.

El propósito de este capítulo es definir y analizar los conceptos que durante los cincuenta años de existencia del pregrado en Construcción de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, se han trabajado y que hasta este momento han quedado inéditos en documentos de trabajo de los docentes que, durante todos estos años, con el ánimo de estructurar el conocimiento en torno a la tecnología en la arquitectura han creado un lenguaje propio, adecuado y coherente con respecto a esta área del conocimiento. El texto incluye los trabajos inéditos de los profesores Caridad Molina de Prada, Mario González Rendón y Román Botero, quienes dieron su consentimiento para la publicación.

Inicia este capítulo con el concepto de *tecnología*, necesario para poder abordar el concepto de *tecnología en la arquitectura*, que como veremos lo podemos clasificar en las *tecnologías de constitución*, *tecnologías de producción* y *tecnologías de conservación*. Para poder entender estos tipos, abordamos los conceptos de *sistema*, *sistema constructivo*, *subsistema de la edificación* y, finalmente, el concepto de *sistema de construcción* y *diseño de ejecución*.

ANTECEDENTES

A partir de la reforma curricular de los programas académicos de la Universidad Nacional de Colombia, en el año 1992, se gestó al interior de la Facultad de Arquitectura una separación de los programas curriculares de Arquitectura y Construcción existentes. Estos programas habían estado hasta el momento muy conectados, no solamente por la gran cantidad de asignaturas que compartían, sino también por el lenguaje utilizado. A partir de esta separación, un grupo de docentes del Departamento

de Construcción y Recursos Técnicos para la Edificación, que atendían las asignaturas de “Construcción” para los dos programas, escribieron:

Es indudable la necesidad de alcanzar niveles de claridad y, por lo tanto, un acuerdo sobre la significación de los términos “sistema constructivo” y “técnica de ejecución”. Sobre la técnica de la claridad lograda, se puede mejorar la comprensión de los planteamientos hechos en los documentos que tratan sobre “La enseñanza de construcción para los estudiantes de Arquitectura y Construcción”. Alcanzado así un estado de acuerdo general nos permitirá reorientar la docencia en el Departamento hacia los objetivos específicos del programa curricular. (González, 1990)

Es evidente que se identificaba una necesidad de llegar a unos acuerdos en cuanto a terminología que permitieran la comprensión en todos los discursos, documentos y escritos sobre la “enseñanza de la construcción para los estudiantes de Arquitectura y Construcción”, y también permitieran reorientar la docencia frente al reto de crear una identidad propia para el programa curricular de Construcción, que había estado a la sombra, desde su creación, de la conceptualización milenaria de la arquitectura, donde de hecho todos los docentes de las asignaturas de construcción tenían esta profesión.

Es así como se inicia un proceso de reflexión en torno a la conceptualización que permitiría diferenciar los campos de formación en Construcción para arquitectos y la formación en Construcción para los arquitectos constructores. Estas reflexiones fueron plasmadas en varios documentos inéditos de los profesores Caridad Molina de Prada, Manuel Prada Girón y Mario González Rendón, que se convierten en la base de este capítulo, y los cuales están adecuadamente referenciados.

Partiendo de estos documentos, y con el ánimo de seguir conceptualizando en la misma vía de las primeras reflexiones, los docentes de la hoy Escuela de Construcción de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional, Sede Medellín, han continuado el trabajo, creando un lenguaje propio. Entre ellos, Román Botero Restrepo y Henry Carvajal Jaramillo, trabajo que también se presenta en este capítulo de una manera ordenada para facilitar su comprensión.

Al hacer una revisión de la conceptualización en el campo de la tecnología de la arquitectura o la construcción arquitectónica, se

encuentran muy pocas referencias en el primer caso y nulas en el segundo. Algunas de ellas son Ching (2004), Escorcía (2009) y Orozco (2008), y una sola publicación que trata el tema específico de uno de los conceptos: el diseño de ejecución, en Carvajal (2013).

DE LA TECNOLOGÍA Y LA TÉCNICA

Son muchas las definiciones de tecnología que se encuentran; así mismo, hay un interés histórico en establecer las relaciones entre “tecnología” y “técnica”. Quintanilla (1988) menciona las grandes orientaciones o enfoques de la técnica y la tecnología: el enfoque instrumental, el cognitivo y el sistémico.

El enfoque instrumental entiende la tecnología como las “herramientas” o “artefactos” que ayudan o son necesarios para llevar a cabo alguna tarea. Así, para levantar grandes pesos se utiliza la grúa como tecnología. En el enfoque cognitivo aparece la ciencia como la gran diferenciadora entre técnica y tecnología. La técnica se define como la aplicación de conocimientos empíricos, aprendidos y aplicados con excelencia dependiendo del grado de experticia; en la sociología de las profesiones podrían denominarse oficios. La tecnología, por su parte, hace uso de la ciencia y, como consecuencia, su avance e innovación dependerán a su vez de los avances científicos. En el enfoque sistémico se entiende la tecnología, no dependiente de la ciencia o representada en el conjunto de artefactos, sino como producto de una unidad compleja, en donde forman parte los materiales, los artefactos y la energía, así como los agentes que la transforman (Osorio, 2002). Este enfoque coincide con la noción, al menos en una de sus dimensiones, de conjunto técnico de Mumford (1988). La tecnología es un conjunto de técnicas que confluyen para configurar un acto técnico. Los materiales, la energía para su transformación, los moldes, son necesarios para obtener el resultado, o el artefacto.

La construcción, sin duda, constituye un acto técnico. Confluyen, en este acto complejo, el conocimiento científico, las dimensiones de tipo organizativo –costos, mano de obra especializada vs. mano de obra no especializada, formación, diseño de ejecución, etc.– y las ideológico-culturales –políticas gubernamentales, investigación y desarrollo de nuevos materiales

o mejoramiento de los autóctonos, escala de producción, conocimientos populares etc.—, de tal manera que se podría definir como tecnología, y no técnica, desde el enfoque sistémico.

Según Gortari (1983) la técnica se refiere siempre a una acción e incluye necesariamente la experiencia previa. Tanto en la actividad científica y tecnológica, como en las otras actividades humanas, existen varias clases de técnicas, entre las cuales destacamos el dominio científico, las técnicas experimentales y las relaciones.

Las *técnicas* se inventan, se enseñan, se aprenden, se transmiten de manera oral o escrita y a través de sus demostraciones en la actividad misma. Su invención y perfeccionamiento son siempre una obra colectiva y progresiva. Las técnicas se desarrollan continuamente, se multiplican sin cesar y cambian al paso en la medida en que avanzan la ciencia y la tecnología.

En todo caso las técnicas constituyen una de las partes más adelantadas de la actividad científica. Ahora bien, las técnicas forman parte de los métodos, pero no se confunden con ellos. Una *técnica* puede figurar en varios métodos sin que constituya necesariamente una parte intrínseca de método alguno. Es más, cada vez que se inventa una técnica mejor, la anterior deja de ser utilizada. Una *técnica* es un procedimiento o conjunto de procedimientos regulados y provistos de una determinada eficacia. También se denomina técnica al conjunto de reglas aptas para dirigir eficazmente una actividad cualquiera y a la destreza necesaria para realizarla. Se llama *técnica* al conjunto de procedimientos y operaciones por medio de los cuales se resuelve una dificultad o se cumple una función concreta. Naturalmente, una misma dificultad o una misma función puede ser abordada por diferentes técnicas. Dentro de la actividad científica y tecnológica, una técnica es un conjunto de operaciones bien definidas y transmisibles, destinadas a producir resultados previstos y bien determinados.

Al estudiar el concepto de técnica, tal como la entienden los expertos en estos asuntos, en la definición siempre aparecen asociados a técnica, otros conceptos tales como reglas, procedimientos, operaciones, métodos, etc., que la definen o caracterizan.

Tecnología apropiada

El concepto de tecnología apropiada se asocia a los desarrollos que buscan mejorar las formas más sencillas y tradicionales que se han empleado para producir, sin llegar a constituirse en tecnologías totalmente industrializadas; de ahí su asociación con las tecnologías intermedias. Otros conceptos asociados son: tecnología de bajo costo, o que permita la producción de un bien dado a un precio que no supere el precio de otras tecnologías existentes en el mundo –en cuyo caso sería mejor hacer transferencia–; tecnología blanda en cuanto procura un equilibrio con el medio ambiente; o tecnología ideológica y cultura pues prevalecen dimensiones de bienestar social antes que las técnicas o las económicas. No es adecuado definir estas tecnologías como propias de los países en desarrollo, pues son relativamente similares a las tecnologías alternativas de los países desarrollados que buscan disminuir las inversiones en bienes de capital e incrementar los beneficios ecológicos y las necesidades sociales.

Desde el enfoque sistémico, las tecnologías apropiadas deben emplear materiales regionales, herramientas de fácil obtención y procesos de fácil aprendizaje que permitan adaptaciones locales; en su dimensión cultural debe integrarse armoniosamente a su contexto, servir como herramienta de creatividad, ser adaptable a las realidades de cada situación e incorporar las tecnologías locales, no sustituirlas; la dimensión organizativa se caracteriza por el uso intensivo de la mano de obra sin disminuir la productividad –relación entre la cantidad de producto obtenido y la mano de obra utilizada–.

Son cualidades de las tecnologías apropiadas en la construcción: el cumplimiento de condiciones técnicas como sismorresistencia, eolorresistencia, pendientes topográficas bajas, suelos con la adecuada capacidad portante, sistemas constructivos adecuados a las condiciones climáticas regionales, materiales y componentes que satisfagan condiciones de seguridad, habitabilidad y durabilidad, implementación de procesos racionalizados de construcción que disminuyan los desperdicios de materiales y mano de obra –este último entendido como la disminución en el esfuerzo de los operarios–, relación

entre los subsistemas constructivos y sus componentes, facilidad de mantenimiento y ampliación, accesibilidad de la comunidad a los equipos de construcción y montaje, posibilidad de la comunidad para aprender rápidamente el sistema con mínima asistencia técnica, etc.; condiciones de tipo organizacional: participación de comunidades organizadas para la toma de decisiones de planeamiento, proyecto y construcción de la vivienda, bajo costo, uso intensivo de la mano de obra, uso de mano de obra de distinto género y distinta edad, alta relación de mano de obra aportada versus mano de obra contratada, cumplimiento de normas etc.; condiciones ideológico-culturales: espacios acondicionados a sus actividades y costumbres, etc.

Algunos ejemplos de tecnologías constructivas apropiadas en Latinoamérica, que cumplen con muchos de los anteriores atributos son: sistemas de mampostería reforzada con materiales cerámicos o bloques de concreto; paneles en concreto reforzados con fibras naturales o acero, grandes bloques de arena de piedra pómez, bahareque y manajo de palma, bloques en suelo cemento compactado, paneles en madera prensada y recubierta con aislantes, madera rolliza, tablonés en madera aserrada, aglomerados de madera, fibras vegetales (quincha), etc.

Tecnología industrializada

El concepto más simple de tecnología industrializada es aquel que sustituye la experticia artesanal por el uso de la máquina tanto en la producción de materiales como en la ejecución o puesta en obra de los componentes. Específicamente, en la construcción se origina en un momento de desfase en su evolución respecto al sector industrial; los conceptos ampliamente utilizados en la industria, como la tolerancia e intercambiabilidad, no se aplican en la construcción de alojamientos hasta los primeros desarrollos de W. Gropius y Wachsamann en 1930. En Colombia, a inicios de la década de los setenta, el desaparecido Instituto de Crédito Territorial contrata la elaboración de estudios tendientes a implementar programas de industrialización de la construcción de vivienda, que le permitirían dar soluciones rápidas y de bajo costo a los procesos de emigración rural.

Las características de una tecnología de construcción industrializada, en el marco del enfoque sistémico, se clasifican desde la dimensión técnica: la racionalización de la producción y ejecución del proyecto, lo cual incorpora insumos o componentes con un alto valor agregado de fábrica, utiliza sistemas que permitan la normalización, estandarización y coordinación dimensional de los componentes, hace uso intensivo de la mecanización y automatización, lo que implica reemplazar trabajo humano por trabajo realizado por máquinas, altas velocidades de construcción y bajos costos. Desde la dimensión organizativa, se caracteriza por el uso intensivo de bienes de capital y el poco uso de mano de obra, el desarrollo de sistemas que disminuyan los desperdicios de recursos y mano de obra, la formulación de programas de construcción de vivienda para periodos suficientemente largos que permitan a los actores involucrados abastecerse adecuadamente para satisfacer la demanda, programas de fomento de nuevas empresas y nuevos productos, programas de financiación a largo plazo de las actividades de producción, construcción y venta de viviendas, programas de capacitación de personal técnico y mano de obra, estructuras organizacionales complejas y dotadas con personal administrativo idóneo, etc. En su dimensión cultural no es su prioridad integrarse armoniosamente a su contexto; crea soluciones habitacionales rígidas que no consultan las necesidades y costumbres de la comunidad, requiere de la creatividad del grupo profesional planificador, mas no de la comunidad, por citar algunas características.

Una de las tecnologías habitacionales de mayor uso en los últimos años en nuestro país es la de muros de concreto vaciado *in situ*, con formaleta autoportante. Consiste en la utilización de encofrados metálicos, que permiten el vaciado total o parcial de muros y placas en concreto en una sola etapa. Esta tecnología, aunque no hace uso de nuevos materiales, ni de equipos o herramientas sofisticados, ni de la producción de componentes en fábrica —fuera de la obra—, sí hace mérito de la racionalización de los procesos de ejecución que la acreditan como una tecnología parcialmente industrializada y cuyos efectos se evidencian en la rapidez de ejecución y en sus bajos costos.

El uso de tecnologías sociales y culturales no significa un anquilosamiento en la utilización de los materiales o los procesos constructivos, al contrario, es un desafío a la investigación, invención e innovación. Algunas maneras de lograrlo son: analizar las mejores tecnologías actualmente en uso en diversos países en desarrollo; retroceder a través de la historia y tratar de descubrir tecnologías anteriores que se volvieron inasequibles por los altos costos de la mano de obra o inventar combinaciones de antiguas y nuevas tecnologías. Por último, la evaluación de una tecnología apropiada requiere de un juicio de valor tanto de quien la provee como de quien la usa.

DE LA TECNOLOGÍA EN LA ARQUITECTURA

Según Monjo (1986), la arquitectura es un “arte funcional”, es decir, que trata de obtener edificios que encierren espacios que se van a habitar, y que para ello deben responder a un nivel mínimo de funcionamiento de acuerdo con las exigencias de uso. Este funcionamiento estará condicionado por el sistema constructivo, el cual debe poder adecuarse al entorno geográfico y climático. Por otra parte, en su proceso de producción hay que distinguir cuatro grandes fases: diseño, producción, transporte y montaje, que se ven condicionadas por el sistema constructivo y sus exigencias tecnológicas referidas al nivel de preparación de la mano de obra, nivel industrial requerido y nivel de mantenimiento necesario, entre otras. Estos dos aspectos funcional y tecnológico tienen una gran incidencia y están condicionados por la economía que establezca y exija el sistema. De acuerdo con lo anterior, la arquitectura deberá responder a estos tres elementos funcional, tecnológico y económico.

Se debe tener en cuenta que la función de la arquitectura ya la concretó Vitrubio en su libro primero al establecer las tres características definitorias de la misma: Firmitas, Utilitas y Venustas. Estas tres características han definido la arquitectura a lo largo de los siglos y siguen plenamente aceptadas.

Por otra parte, González, Casals y Falcones (2008), partiendo de estas tres características, plantean cinco fines o principios que han de regir la

arquitectura y todos sus elementos espaciales o materiales: la adecuación del espacio al uso previsto, la adecuación del ambiente al uso previsto, la integridad de las personas que habitan y del mismo edificio, la conveniencia estética y finalmente la eficiencia de su producción.

La consideración de González, Casals y Falcones resulta más integradora, en la medida que no separa lo “tecnológico” de lo funcional, incluyendo en este elemento la parte de la producción. Y resulta más conveniente en la medida en que algunos aspectos de lo funcional responden también al tema tecnológico, como son la utilidad y la integridad. Por su parte, aspectos como el confort ambiental pertenecen al principio de utilidad, y las acciones físicas, mecánicas y climáticas pertenecen al principio de integridad, y condicionan la respuesta constructiva del edificio, es decir, el aspecto tecnológico. Incluso, estos consideran dentro de la funcionalidad o uso, que pertenece al principio de la utilidad, la definición de la forma como el primer embate gravitatorio. Queda por tanto añadir el aspecto socioeconómico, que estaría dentro del principio de eficiencia de la producción considerado por González, Casals y Falcones.

Es necesario pues, en aras de no continuar con la separación que a través de la historia se ha hecho entre lo arquitectónico y lo constructivo, asignándole erróneamente a este último el aspecto tecnológico, considerar la anterior definición de función de la arquitectura para la definición de la *tecnología en la arquitectura*. Los medios que responden a todos estos elementos, fines o principios son el espacio y la materia.

Los principios se traducen en numerosas y diversas condiciones, que denominaremos requisitos y que, según sea su naturaleza, dependen de una o más variables. La satisfacción de los requisitos, medidos según sus variables, exige de los edificios, sus partes (que también denominaremos subsistemas constructivos) y sus elementos, unos modos de comportamiento genéricos, que denominamos exigencias. Para saber si una solución constructiva, es decir, una manera determinada de construir un elemento, un subsistema o un edificio es la adecuada para esas exigencias, debemos conocer las prestaciones que es capaz de aportar (el elemento, el subsistema o el edificio) frente a cada exigencia en concreto; la prestación habrá de ser igual o superior a la exigencia. Las prestaciones son consecuencia de las características de

las formas y los materiales que constituyen los elementos constructivos. Las características de las formas y los materiales dependen de los procesos de producción que hacen posibles esas formas y materiales. (González, Casals y Falcones, 2008, p. 15)

Con el ánimo de aclarar lo tecnológico en la arquitectura y teniendo en cuenta todo lo anteriormente tratado, podríamos decir que la tecnología en la arquitectura se divide en tres, tal como se enuncia a continuación:

Las “tecnologías de constitución”

Se refiere a la definición de todos aquellos sistemas que se requieren para transformar y dominar los fenómenos externos, espacio, luz, calor, aire, gravedad, originando lugares seguros, estables y confortables.

Los planes de estudio para las carreras de arquitectura e ingenierías, en Colombia, en cuanto a la edificación, privilegian un énfasis hacia las tecnologías de constitución; los ingenieros, hacia el sistema estructural y de instalaciones; y el arquitecto, hacia todos los sistemas en niveles de definición diferentes, la forma en los sistemas estructurales, algunas exigencias en las instalaciones y todos los atributos en los sistemas de cerramientos y acabados. Sin embargo, es bien sabida la falta de detalle en cuanto a composición y atributos en el proyecto arquitectónico.

Cabe anotar que las tecnologías de ejecución no son de exclusivo dominio de estos profesionales y pueden ser abordadas por otros que tengan la fundamentación científica, tecnológica y técnica requerida para su desarrollo.

Las tecnologías de constitución se refieren tanto al componente material, como al sistema constructivo, es decir, al conjunto de componentes que por sus atributos y relaciones entre atributos cumplen una función específica dentro de la edificación, ya sea estructural, ambiental, de confort o estética. Dicho de otra manera, se refiere a la materialidad de la edificación.

Las “tecnologías de producción”

En la escala del edificio, la tecnología actúa en la medida que transforma materia prima en objeto construido, mediante la utilización de técnicas operacionales, administrativas, estrategias, equipos, personal, recurso financiero, herramientas, espacio, tiempo, etc., de una manera lógica, creativa, eficaz y eficiente, en los aspectos técnicos, administrativos y legales, dentro del concepto de industrialización y que requieren de un *diseño de ejecución*.

En la escala del proyecto podemos identificar varios escenarios, como son: la gerencia de proyectos; la administración de obras, que incluye la planificación, la dirección y el control; la interventoría de obras y las demás especialidades relacionadas con la planificación y control de obras, como la programación, el presupuesto, la gestión de calidad, ambiental, y de seguridad.

En todo el mundo encontramos carreras profesionales dedicadas exclusivamente a estas tecnologías, que requieren de una fundamentación científica para intervenir tecnológicamente todos los factores que tienen lugar en la producción y que también requieren un conocimiento de los sistemas constructivos que han sido definidos mediante las tecnologías de constitución.

Las “tecnologías de conservación”

El estudio de estas tecnologías se ha generalizado en nuestro medio y en el mundo por especialistas arquitectos, ingenieros civiles y constructores que profundizan en el tema. Causa de esto puede ser la consideración de estas tecnologías como de alto nivel, es decir, que para su estudio se requiere una vasta experiencia en la construcción o un gran conocimiento científico. Precisamente la patología es considerada como una ciencia que estudia el comportamiento de las edificaciones, sus lesiones y la definición de tecnologías de intervención. Se apoya en un método sacado de la medicina para aplicarlo a las edificaciones.

DE LAS TECNOLOGÍAS DE CONSTITUCIÓN

Es necesario entonces, para comprender las *tecnologías de constitución en la arquitectura*, definir inicialmente el concepto de *sistema* y *sistema constructivo*, toda vez que este es el sistema básico o de primer nivel en la constitución de las edificaciones.

Según el Diccionario de la Lengua Española, “sistema” es un “conjunto de reglas o principios sobre una materia enlazados entre sí. Conjunto de cosas que ordenadamente relacionadas entre sí contribuyen a determinado objeto” (Real Academia Española, 2001).

En los trabajos inéditos del profesor Mario González, se dice que el concepto de sistema promete ser enormemente fructífero para las ciencias sociales, como lo es ya para el urbanismo. Desarrollada por biólogos, economistas y sociólogos, la “teoría general de sistemas” propone un lenguaje científico unificado que descubra los isomorfismos o similitudes de estructura entre fenómenos y procesos de distintas ciencias; es lo que en Europa se conoce como estructuralismo.

Sistema

Un *sistema* es un conjunto de objetos, más las relaciones entre los objetos y entre los atributos de los objetos (Racionero, 1978). Los *objetos* son las partes o componentes del *sistema*, y pueden ser de muchos tipos, por ejemplo: átomos, estrellas, gases, ecuaciones, neuronas, variables, reglas, leyes, conexiones, ciudades. Los *atributos* son propiedades de los objetos, como volumen, temperatura, calor, tamaño físico, forma de la ciudad, su tamaño, su población, el tipo de actividad económica. Las *relaciones* de un sistema son las posiciones relativas (relaciones estáticas) que estructuran el sistema y las interacciones (relaciones dinámicas) que comunican y dan conexión al sistema.

A partir de esta definición se pueden plantear algunas ideas, entre ellas las siguientes:

- Que los “sistemas” son conjuntos, es decir, “grupos de objetos o componentes que constituyen el sistema”.

- Que los “componentes” que constituyen el sistema, interactúan unos con otros mediante las relaciones que se establecen entre ellos.
- Que las “interacciones” entre los componentes de los sistemas se deben a las relaciones entre los “atributos” característicos de los componentes y a la influencia que puede tener cada “atributo” sobre los demás componentes o sobre los atributos de los demás componentes.
- Que dado lo característico de las interrelaciones entre “Componentes” se puede decir que el sistema es lo que caracteriza al conjunto de componentes interrelacionados.

Es necesario, entonces, asociar este concepto a la *arquitectura*; en este caso estaríamos hablando de *sistema constructivo*, basados en el concepto de *sistema*.

Sistema constructivo

Al aplicar la noción de sistema a la construcción, aparece el concepto de “sistema constructivo”. Para ver de qué manera se consolida el concepto y qué implicaciones tiene se deben entender algunas definiciones:

Atributo

Requisito funcional para que cada componente del sistema constructivo pueda agruparse. Pueden ser:

- Dimensionales: coordinación dimensional. Conjunto de requisitos formado por las dimensiones del componente o de sus partes.
- Morfológicos: expresión formal de las exigencias funcionales. Compatibilidad de formas. Expresión formal de las exigencias funcionales, condicionante de la configuración física del elemento entendida como resultado.
- De correlación: interna y externa. Contempla las relaciones funcionales existentes entre los componentes considerando el contexto.
- De uso: maniobrabilidad, seguridad de uso, resistencia mecánica. factores o requisitos en los que se fundan la cualificación de las características de servicio o utilización.

- Ecológicos y sicotécnicos: pro-preservación del medio ambiente. Extensa gama de planteamientos que tienen por objeto la preservación del medio ambiente, el clima natural o artificial, la higiene, la protección de los agentes atmosféricos, y de la ventilación, la iluminación o la acústica.
- De durabilidad: permanencia en el tiempo de las características o atributos precedentes.

A manera de ejemplo y para una mayor comprensión, se podría preguntar: ¿cuáles son algunos de los “atributos” que caracterizan a los componentes de los “sistemas constructivos”? Los atributos que nos interesa considerar son de uso: la resistencia física, el peso, la manejabilidad, etc.; sicotécnicos: el color, la textura, el brillo, etc.; morfológicos: el tamaño, la forma, etc.; dimensionales: sus medidas, y económico: el costo, la eficiencia, etc.

El atributo es lo que caracteriza a cada uno de los componentes del sistema constructivo, por lo que muchas veces se llaman características. Cada una de ellas, y todas en su conjunto, permiten identificar de manera particular y unívoca el *componente*, y asociadas aportan una de las funciones del *sistema constructivo*.

Componente

La ISO¹ define los componentes de construcción como “productos fabricados bajo la forma de unidades distintas dispuestas para entrar a formar parte en la construcción de una obra”.

El Icontec² define como componente de obra un “elemento integrante de una edificación en proceso de construcción”. Además, hace la diferenciación del componente de obra como componente de montaje cuando siendo prefabricado este se coloca o monta en obra; y componente de construcción cuando el componente se construye en la misma obra.

Dicho esto, entenderemos como componente el material o conjunto de materiales que, satisfaciendo las condiciones de compatibilidad de formas,

¹ ISO: Organización Internacional de Estandarización, por sus siglas en inglés.

² Icontec: Instituto Colombiano de Normas Técnicas.

coordinación de dimensiones y posibilidad de combinación, pueda unirse para generar una parte constitutiva completa de la edificación.

La diferencia entre componente y subsistema consiste en admitir el subsistema como generador exclusivo de la función que suministra (por ejemplo, cerramiento), mientras que el componente, aun cuando proporciona también distintas funciones, requiere la unión con otros componentes para completar la función exigida (por ejemplo, ladrillo).

En los sistemas constructivos, los componentes se entrelazan en una cadena, en la que en el primer eslabón se encuentran los materiales básicos de construcción, en su estado más simple (arena, cales, yesos y arcillas, metales). Más adelante en la cadena aparecen los materiales compuestos (hormigones, cementos), en los cuales ya hay relaciones entre los atributos de algunos materiales simples que los constituyen. Continúan en la cadena los componentes semielaborados, representados por toda la gama de productos básicos al alcance del constructor (bloques, ladrillos, tuberías, aparatos sanitarios). Hasta aquí, el conjunto de productos que conocemos como materiales de construcción.

Hasta ahora tenemos solamente “componentes” del sistema, dotados de atributos, pero sin relaciones definidas entre ellos; esas solo aparecerán cuando en el taller (en los casos de prefabricación), o en la obra, se “construyan” los conjuntos funcionales (panel de fachada, muro de cerramiento, cercha para techo, armazón de cubierta, etc.) en los cuales las interacciones entre componentes, o entre atributos de componentes, generan una unidad en el conjunto, característica que determina y confiere el valor de uso o la utilidad específica en la obra.

Solamente cuando se “construyen” conjuntos funcionales como muros de cerramiento, armazones para cubierta, estructuras portantes, etc., en los cuales las relaciones entre los componentes o entre los “atributos” de los componentes generan unidad en el conjunto, aparece el valor de uso o función específica del “sistema constructivo” en la obra.

A partir de este nivel ya se puede hablar, aunque inapropiadamente, de “sistema constructivo”; y ya podemos referirnos, por lo tanto, al “sistema constructivo de un muro” o al “sistema constructivo de una estructura de cubierta”, y en tal caso, hablaremos del conjunto de

componentes y las relaciones entre sus atributos, que los caracterizan en sí mismos y al sistema de manera global.

De acuerdo con lo anterior, para configurar un *sistema constructivo* será necesaria la unión de varios componentes que podrán ser: simples; materiales simples, compuestos; materiales compuestos, semielaborados; materiales semielaborados. Cabe señalar que la investigación de materiales y la industrialización de la construcción han permitido la conformación de materiales que podríamos llamarlos, en otra escala o última escala, materiales elaborados. Y son comercializados en un nivel tan alto de composición que cumplen funciones que anteriormente solo era posible mediante la utilización de más de un componente, como por ejemplo el geodrén, que se comercializa como un material compuesto por una barrera de sólidos y un material drenante.

Adicionalmente podemos decir que la palabra *componente* se usaría para designar un material de manera genérica, ejemplo, mampuesto; y la palabra *material* se usa para designar el tipo de *componente*, ejemplo, ladrillo cerámico.

Material

Cualquiera de las materias que se necesitan para ejecutar una obra. Todos los elementos útiles para la ejecución y puesta en obra de las materias que sirven para la realización de una construcción. Un material es adecuado para cumplir una misión cuando por sus características posee cualidades para satisfacer las necesidades que impone esa misión.

Los materiales se clasifican en:

- Simples: en estado natural (arenas, piedras, arcillas, etc.).
- Producidos industrialmente (cemento, cal, yeso, etc.).
- Compuestos: combinaciones de materiales simples (hormigón, mortero).
- Semielaborados (bloques, ladrillos, tubería, etc.).
- Elaborados (placas, paneles, pórticos).

Teniendo en cuenta esta clasificación, y lo relacionado en el apartado anterior, entendemos que los materiales se usan en la construcción en

estados diferentes; los que usamos en su forma natural: simples; los que requieren de un proceso industrial y la unión de varios materiales simples: compuestos; los que tienen un proceso de fabricación en donde se les da atributos de forma: semielaborados; y los que se fabrican industrialmente mediante la unión de más de un material semielaborado: elaborados.

Del subsistema y el sistema constructivo

Es necesario entonces ascender en la escala de análisis para entender el concepto de *sistema constructivo*, teniendo en cuenta los análisis hechos hasta este punto.

Si se continúa ascendiendo en la escalera, en el siguiente peldaño se ubican los conjuntos funcionales de obra, estos son “paquetes de componentes” que desempeñan roles específicos en obra y están a cargo de determinadas funciones pero que pueden ser sustituidos o intercambiados con otros paquetes que tengan capacidad de cumplir similares funciones, aunque los atributos de sus componentes sean diferentes.

Veamos un ejemplo que nos aclare esto. Un “subsistema de estructura” de un edificio está constituido por un conjunto de partes componentes (zapata, pedestal, viga de amarre) y por las relaciones entre sus capacidades de trabajo, su forma y su resistencia a las cargas y a la degradación. Su presencia es indispensable en todo edificio que tenga peso y que, por lo tanto, deba reposar sobre un terreno, y por lo tanto garantizar un buen nivel de estabilidad. Esta subestructura es indispensable desde el punto de vista de su función, así, solo podrá ser sustituida por otro subsistema que cumpla un mismo papel, con similar o mejor eficiencia, pero, probablemente, caracterizado por otros atributos.

El “subsistema de instalaciones hidráulicas” podrá estar constituido por componentes de diferentes materiales y, por lo tanto, diferentes atributos, aunque funciones similares. En casos como estos, podríamos elegir un subsistema de abastos en “cobre” o en “PVC”, dependiendo de qué otros determinantes lo aconsejen (costo, durabilidad, disponibilidad).

En ambos ejemplos hay un conjunto de partes, interrelacionados, que caracterizan “el paquete”; “eso” que le da tal caracterización es lo que debemos entender por “sistema constructivo” (de cada uno de los subsistemas constitutivos de la edificación).

Continuando con la cadena, el siguiente y último eslabón lo constituye el edificio en su conjunto, el cual está compuesto por un grupo de subsistemas dotados de atributos propios y que se relacionan entre sí, dando lugar a la aparición o configuración de un “sistema constructivo de nivel superior”.

De los anteriores planteamientos se debe desprender que:

- Cada subsistema es una parte o componente, a su vez, del sistema constructivo del edificio.
- Cada subsistema está a su vez dotado de atributos que lo caracterizan como conjunto, y se distingue por las interrelaciones entre sus atributos propios.
- Cada edificio posee, tiene o es “un sistema constructivo” en sí mismo, resultado de los componentes que lo constituyen (subsistemas) y de las relaciones entre estos y entre los atributos de estos.

Se concluye finalmente que “sistema constructivo” es un concepto que se refiere especialmente al “ser” del edificio en sí mismo y al “ser” de cada uno de los componentes que lo constituyen, y así sucesivamente hasta llegar a niveles en los cuales ya no se distinguen componentes o elementos relacionables unos con otros.

De la anterior conclusión se desprende la siguiente definición: sistema constructivo es el conjunto relacionado de partes componentes de la edificación, dotados de atributos que se interrelacionan y cuyas relaciones, en conjunto, caracterizan cada edificación.

Si se revisa la bibliografía, encontramos que un edificio es un conjunto de elementos que sirven para cerrar y modificar un espacio, y que a su vez permite a los seres humanos desarrollar múltiples actividades, como lo afirma Orozco (2008). Por otra parte, un edificio se puede clasificar de acuerdo con diferentes tipos como son: residenciales, comerciales, educativos, de salud, de cultura, recreación,

industriales, gubernamentales, públicos, religiosos y de transporte. Una edificación es el resultado de un conjunto de elementos de construcción o componentes constructivos, los cuales, conectados de una manera lógica, cumplen con una función específica (Ching, 2004).

También se puede afirmar que los subsistemas se pueden clasificar en primarios, como son los estructurales, de cerramiento y de servicio, cuya función es permitir el uso de la edificación, y en secundarios, que proporcionan comodidad, estética y durabilidad.

En general, los subsistemas delimitan y clasifican el espacio que se construye, brindan seguridad, estática, equilibrio y generan confort a los usuarios de la edificación. Por tanto, un edificio puede definirse también como el conjunto de sistemas y subsistemas que, coordinados unos con otros, hacen que la edificación tenga un excelente comportamiento y funcionamiento, o bien como el conjunto de componentes que forman unidades autosuficientes, suministran funciones que pueden ser individualizables del resto y que, agrupadas de una determinada forma, conforman la edificación. El subsistema puede identificarse también como una unidad funcional de obra que a su vez se define como el conjunto de componentes que agrupados conforman una parte constitutiva completa del edificio, y que por sus características cumple una función determinada y específica.

Los subsistemas son conjuntos de componentes constructivos que integran parte de uno de los sistemas ya mencionados anteriormente en la edificación. Monjo (1986) define los subsistemas como los elementos que pertenecen a un sistema de la edificación y que cumplen una misma función.

En la tabla 1 se presentan las definiciones de sistemas constructivos y los subsistemas que componen la edificación, según varios autores.

Tabla 1. Definiciones y tipos de sistemas en la edificación

Autor (año)	Definiciones de sistemas en la edificación	Sistemas que componen la edificación
Monjo C. (1986)	Conjunto de materiales, elementos y formas constructivas, coordinadas entre sí, regidas por leyes físicas y geométricas y que constituyen un edificio o parte de él.	Estructural Cerramientos Acabados Instalaciones Externo
Vélez (2003)	Conjunto de subsistemas que conforman la edificación interactuando entre sí con todos sus componentes.	Estructural Cerramientos Instalaciones Acabados Contexto
Ching (2004)	Conjunto de partes relacionadas que forman un todo más complejo y que sirven a un propósito común.	Estructural Envolvente Mecánico Externo Normativo
Orozco (2008)	Sistemas tradicionales e industrializados.	Estructural Envolvente Instalaciones
Escorcía (2009)	Relación de componentes que organizados de una manera lógica cumplen una función determinada.	Soporte Mecanismos Envoltura Particiones

Fuente: elaboración propia.

Hay dos aspectos importantes a considerar:

- La descomposición del cuerpo construible en subsistemas, a lo que corresponde una clasificación orgánica según las funciones desarrolladas por cada uno y sus respectivas especificaciones.
- La definición y clasificación de los requisitos que deben satisfacer los distintos subsistemas que componen la edificación.

De acuerdo con lo anterior, un edificio presenta los siguientes subsistemas, según Escorcía (2009).

- Sistemas de soportes: suelos, cimientos y estructura.

- Sistemas de mecanismos: canalizaciones y redes, instalaciones varias, aparatos y equipos.
- Sistema de envoltura: cubierta, cerramientos, fachadas.
- Sistema de particiones: divisiones interiores, muros y muebles fijos.

También se podrían considerar como subsistemas aquellos que son externos a la edificación, pero que son necesarios para que esta pueda funcionar; ejemplos de subsistemas externos son: replanteo, movimiento de tierras, vías de acceso, obras provisionales, etc.

La diferencia entre componente y subsistema consiste en admitir el subsistema como generador exclusivo de la función que suministra (ejemplo, cerramiento), mientras que el componente, aun cuando puede proporcionar igualmente distintas funciones, requiere la unión a otros componentes para completar la función exigida (ejemplo, ladrillo).

A continuación, en la tabla 2 se muestran las definiciones de los sistemas de la edificación.

Tabla 2. Sistemas, subsistemas, componentes y sus funciones dentro de la edificación

Sistema	Subsistema	Componentes	Función
Estructural	Subestructura	Elementos de la cimentación (zapatas, vigas de fundación, losas de fundación, pilas, pilotes, caissons).	Transmitir las cargas de la superestructura al suelo de cimentación.
	Superestructura	Columnas, vigas, losas, escaleras, muros portantes.	Soportar y transmitir las cargas de diseño a la cimentación.

Sistema	Subsistema	Componentes	Función
Envolvente o cerramiento	Cerramientos verticales	Muros de fachada Muros interiores y divisorios.	Protección del exterior y división de espacios. Estética
	Cerramientos horizontales	Cubiertas y techos.	Protección de la intemperie
	Puertas	Elementos componentes de puertas.	Seguridad Privacidad Acceso
	Ventanas	Elementos componentes de ventanas.	Ventilación Iluminación
Mecánico o de instalaciones	Instalaciones	Eléctricas Hidrosanitarias De gas De climatización De comunicaciones De transporte De seguridad De evacuación	Proporcionar a los usuarios de la edificación calidad de vida.

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, Orozco (2008) también incluye dentro de los sistemas a los tradicionales y a los industrializados. Sistemas tradicionales: abarcan los conceptos de diseño, construcción y ejecución que en una región se adaptan como la práctica usual de construcción, durante un periodo de tiempo considerable. Sistemas industrializados: son aquellos en los que se aplican determinadas técnicas, prefabricados, elementos a repetición, coordinación de dimensiones y mano de obra calificada.

Es importante resaltar que según la manera en que se relacionen los sistemas de la edificación, es indispensable considerar los siguientes factores, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Factores y consideraciones contempladas en el diseño de los sistemas de la edificación

Factor	Consideraciones
Requerimientos de funcionamiento	Seguridad estructural. Resistencia al fuego. Dimensionamiento de los elementos estructurales. Ventilación y circulación de aire. Aislamientos térmico y acústico. Durabilidad. Seguridad a los usuarios.
Estético	Relación del edificio en su ubicación y contexto. Diseño.
Normativo	Cumplimiento de todas las normas pertinentes relacionadas con el diseño, ejecución y uso de edificaciones.
Económicos	Análisis del costo de toda la vida útil del edificio. Evaluación financiera del contexto del proyecto.
Ambiental	Conservación de recursos. Eficiencia energética. Buen uso del agua y de medios de transporte.
Prácticas constructivas	Diseño de ejecución.
Tecnológico	Técnicas, materiales, equipos, mano de obra, programas de computador, metodologías de trabajo.

Fuente: elaboración propia.

Por último, es importante aclarar que los sistemas de la edificación cumplen múltiples funciones simultáneamente para garantizar el adecuado funcionamiento de esta. Los sistemas y subsistemas de un edificio deben garantizar una buena resistencia estructural, seguridad, comodidad, estética, economía y brindar calidad de vida a sus habitantes y usuarios durante toda su vida útil.

DE LAS TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN

Para abordar este concepto será necesario entender qué es *sistema de construcción, diseño constructivo, diseño de ejecución y técnica de ejecución*.

En cuanto a los conceptos relacionados con las *tecnologías de producción*, podríamos considerar, al igual que se hizo con las *tecnologías de constitución*, varios niveles. En este caso se irá desde lo general a lo particular, o desde un nivel amplio hacia un nivel un poco más estrecho.

De los sistemas de construcción

En un nivel amplio consideramos el concepto de *sistema de construcción*. Este es un concepto poco utilizado, pero que es necesario tener en cuenta para poder entender los demás conceptos.

Julián Salas S. en su libro *Alojamiento y Tecnología* (1981), lo define como: “entidad heterogénea formada por personas, medios materiales y conocimientos de una determinada tecnología, que hacen posible la realización del acto de construir en todas sus fases”.

Son muchas las etapas que hay que cubrir para que un sistema se haga acreedor a dicho nombre. A título de ejemplo, se pueden señalar las siguientes etapas en el proceso del desarrollo de un nuevo sistema:

- Formación del equipo humano que ha de desarrollar el sistema.
- Comprobación del mercado potencial.
- Análisis de los tipos de edificación del mercado que se pretende abarcar con el sistema.
- Análisis y evolución de los sistemas similares existentes.
- Materialización inicial del diseño del sistema.
- Realización de una comprobación formal del diseño del sistema. Prototipo.
- Fase de ensayos y evolución del resultado.
- Toma de las principales decisiones de administración.

Sobre el diseño constructivo

La actividad constructora reclama su propio concepto del diseño debido a su compromiso con la buena factura del hábitat humano, con la seguridad de los edificios, con el buen uso de los materiales y de los recursos naturales, con las exigencias económicas y temporales de su ejecución, entre otras muchas otras razones. La actividad de construir posee su

propia área de diseño definida como el diseño de sistemas constructivos y el diseño de la ejecución.

Para el constructor, el diseño constructivo se inicia donde el arquitecto concluye su diseño arquitectónico. El primero define espacios, áreas y formas, define las estructuras, los acabados de las superficies, los cerramientos y muchos otros elementos funcionales o plásticos que son de su completo dominio; todo ello en el sentido formal y dimensional. Son suficientes tareas para él, tal vez demasiadas, y eventualmente llega más allá para adentrarse un poco en el problema de la ejecución, que generalmente no es de su preferencia y otras veces no es de su inmediato conocimiento, aunque existen muchas y notables excepciones.

Se podría decir que estas dos fases: diseño arquitectónico y diseño constructivo, no continúan una después de la otra; pueden coexistir en la medida en que estas labores se traslapan en un trabajo interdisciplinario.

El diseño de sistemas constructivos se refiere a ingeniar nuevas maneras de utilizar los materiales y sus posibilidades constructivas. No debe olvidarse que de acuerdo con la categoría que tenga el sistema constructivo, objeto de diseño, puede tratarse de un subsistema, es decir, de un componente del sistema total, que a su vez podría constituir en sí mismo otro sistema.

Aquí se encuentra un ejercicio, que bien podría ser parte de las *tecnologías de constitución*, pero que se puede ubicar dentro de las *tecnologías de producción*, en la medida en que se trata de un trabajo muy especializado, que requiere del conocimiento de materiales, sus características, sus posibles combinaciones, sus funciones, etc., y que en muchos países son del fuero del *constructor*, más que del *diseñador*. Por otro lado, los sistemas se pueden diseñar sin el contexto de una edificación en particular, ya que hacen parte de la misma industrialización de la construcción y se ofrecen como productos para ser utilizados por los *diseñadores* o *constructores* en sus edificios. Es más, este ejercicio es el producto de un trabajo interdisciplinario que podría involucrar muchas profesiones y especialidades.

Entre los objetos más inmediatos del diseño de sistemas constructivos pueden citarse los siguientes:

- La concepción de estructuras diferentes por medio de nuevas aplicaciones de los materiales o de nuevas combinaciones de ellos.
- La concepción de cerramientos no tradicionales, por medio de nuevas combinaciones de sus materiales, o que tienen diferente interacción con el esqueleto estructural, con los acabados y con las instalaciones.
- Los encofrados de estructuras vaciadas en sitio.
- Las cimbras para estructuras vaciadas en sitio.
- Los encofrados de componentes prefabricados mayores y menores.
- Los componentes de mamposterías y de cerramientos.
- La fijación y constitución precisa de múltiples elementos que intervienen en los acabados, tanto livianos como pesados, interiores o exteriores.
- Las instalaciones temporales de obra.

Todos los elementos mencionados constituyen en sí mismos sistemas o subsistemas; estos últimos denominados también unidades funcionales de obra, y unas veces demandan soluciones sencillas y sensatas, mientras que otras veces se tornan difíciles de resolver.

La metodología para el diseño constructivo se puede resumir en:

- Objetivo: definición del objeto o del sistema constructivo que se quiere diseñar y de la función que ha de cumplir. Determinación de la cantidad que se ha de producir o construir.
- Fase investigativa: documentación bibliográfica o de otro tipo que sea aplicable al caso de estudio o a casos similares.
- Fase de diseño: concretar características generales del diseño. Planteamiento de alternativas: análisis de posibilidades, ventajas y desventajas de cada una. Posibles materiales a emplear. Elección de una alternativa y desarrollo de ella: concepción estructural y formal. Estudio de los componentes, de su ensamble y de su funcionamiento relativo.

Sobre el diseño de ejecución

El término “ejecutar” en el lenguaje del constructor significa realizar o construir en el sentido literal; se trata de llevar a la realidad un objeto material cuyo diseño se conoce con exactitud.

Tratando de llegar a una expresión óptima sobre lo que significa diseño de la ejecución, se puede decir que se trata de una disciplina tendiente a asimilar el proceso de construcción a la actividad industrial para aproximarse al rigor y a la exactitud que caracterizan a este último. Si se quisiera expresar en forma más breve, podría decirse que es el estudio del proceso constructivo (total del edificio) desde la perspectiva de la producción.

Diseñar un proceso de ejecución es trazar una estrategia para elaborar un objeto de cualquier dimensión física o técnica, desde un pequeño prefabricado hasta una gran estructura. No se trata entonces de crear algo nuevo en lo que se refiere a la forma, sino de ingeniar un procedimiento factible para llevar a la realidad un diseño, de manera lógica y ordenada, y de proyectar los recursos que lo acompañan.

Entre los objetos inmediatos del diseño de ejecución se consideran comprendidos:

- Toda estrategia de construcción necesaria para llevar a cabo cualquier proceso de manera sistemática y ordenada.
- La concepción de métodos de construcción tendientes a la industrialización o la construcción en serie de mayor velocidad y eficiencia.

Guardando las debidas diferencias con la industria manufacturera, por ejemplo, el proceso de construcción es un proceso de producción compuesto por diversas fases o pasos debidamente relacionados. El diseño de procesos de producción pertenece originalmente a la actividad industrial. La actividad constructora, entre nosotros, no puede clasificarse como una actividad industrial; suele denominarse así por su participación en la economía nacional, pero no por sus métodos de trabajo. Tampoco es acertado asimilarla a una línea de producción como algunos han pretendido; solo a veces tiene semejanzas. Pero a pesar de eso, sus procesos requieren organizarse de

manera imaginativa y coherente cada vez más refinada para responder a exigencias de calidad, tiempo y costo. Por lo tanto, constituyen un objeto definido para el diseño de ejecución.

Es bien diferente diseñar un sistema constructivo a diseñar su proceso de ejecución, porque el primero es un objeto material, y el otro es un método que conduce a la construcción de dicho objeto. Tomemos un ejemplo local citado por el profesor Román Botero en uno de sus documentos inéditos, que aparte de lo familiar que puede sernos, es bien representativo:

Un gran almacén de departamentos posee un parqueadero de superficie con capacidad para 200 automóviles, y debido a su insuficiencia ha encargado un proyecto para elevar su capacidad a 400 puestos. Pero el asunto tiene determinantes muy serias, porque el parqueadero actual permanecerá funcionando, solo con algunas limitaciones en el servicio. Esto requiere un plan de ejecución, que bien puede ser un reto para cualquier constructor, quien tendrá que formularse mil preguntas para formular una estrategia aplicable al problema. El constructor deberá trabajar por etapas, de manera que el parqueadero existente vaya transformándose en un edificio subterráneo que albergará a 200 vehículos, y sobre él, existirá el mismo parqueadero de superficie que dará cabida a otros 200 puestos.

El ejemplo anterior no solamente involucra el planteamiento de un proceso, cosa que resalta, sino también el diseño de un sistema constructivo, y a pesar de lo serio que pueda parecer, todo constructor debe saber que cuando menos lo piense puede estar enfrentado a un problema semejante, de magnitud mayor o menor, pues cuando emprende cualquier obra necesita marcar una estrategia para su desarrollo y aunque parezca que puede aplicar un molde o modelo establecido, cada caso presenta condiciones y peculiaridades propias.

Para entender el concepto es necesario considerar lo que dice Cavajal (2013), al respecto: se requiere tener en cuenta unos elementos o variables para diseñar la ejecución.

Para iniciar podríamos decir que se cuenta con unos datos que están expresados en unos planos y unas especificaciones, los cuales son los datos para la fabricación del producto.

¿Qué es lo que se debe resolver? Idearse la forma de cómo llevar estos datos a la realidad. Entonces, para nosotros poder convertir los datos en un producto, tenemos que hacer uso del Diseño de Ejecución. El diseño de ejecución es pues el planteamiento de las variables que inciden en el proceso de ejecución y el desarrollo de estas. Estas variables se tienen que abordar de una manera lógica, ordenada y metódica, haciendo uso de la información adecuada y concreta, para garantizar el éxito en su definición y, como consecuencia, su puesta en práctica, mediante la dirección y el control durante la ejecución del proyecto construible. Para la consideración de estas variables, inicialmente se tienen que estudiar todos los datos existentes del proyecto: planos, especificaciones, etc. En este estudio se deberá considerar: conocimiento preciso de los sistemas constructivos que integran el proyecto, características de los materiales, normas a cumplir, condiciones de ejecución de los trabajos, compromisos contractuales como programación, presupuesto, etc. Luego de esto se deberán considerar:

- Actividades precedentes y simultáneas.
- Localidades. Entorno donde se desenvuelve la actividad, espacios necesarios.
- Programación. Rendimiento, metas. Plazos.
- Definición de materiales que cumplan las especificaciones. Requisitos de calidad.
- Suministro de materiales. Programa. Trámites de importación.
- Costos. Presupuesto
- Materiales a procesar. Sistemas de producción.
- Almacenamiento y transporte de materiales procesados y a procesar. Dimensiones y localización de almacenes. Manera de almacenar. Almacenamiento en el sector de producción.
- Recepción de materiales. Cómo, quién y con qué.
- Transporte vertical y horizontal. De materiales. De personas. Accesos.
- Equipo a utilizar. Definición suministro. Operación.
- Herramientas a utilizar.
- Personal. Definir. Conseguir. Entrenar.
- Calidad. Procedimiento documentado. Instrucciones de trabajo. Actividades de recepción, inspección en el proceso y final. Identificación para la trazabilidad. Acciones preventivas.
- Seguridad y salud ocupacional. Riesgos del proceso. Implementos de seguridad.
- Ejecución de los trabajos. Planos de taller.

De aquí el diseño de ejecución nos tiene que llevar, a que, al iniciar una actividad de construcción, se tengan todas las variables que influyen en

el proceso (que son distintas a las variables del producto) definidas y estudiadas. Si agrupamos estas variables de una manera lógica y metódica, podríamos identificar tres fases del diseño de ejecución. Una en la que se estudie y defina el objeto a construir y su localización. Otra en la que se definan los recursos necesarios para la ejecución. Y la última en la que se definan todos los sistemas de preproducción y producción necesarios para la ejecución de este. Estas fases las podríamos llamar: estudio del caso, análisis de recursos y producción, respectivamente. (Carvajal, 2013)

De la técnica de ejecución

Cada uno de los *sistemas constructivos*, para materializarse, requieren de una técnica, que en este caso llamaremos *técnica de ejecución*.

Al hablar de técnicas de ejecución, el profesor Mario González, en uno de sus documentos inéditos, retoma la definición de Gortari (1983) y construye una definición específica para decir que “Técnica de ejecución” es el conjunto de procedimientos exigidos por la dirección “técnica” de la obra, tanto para el empleo de las herramientas y equipos, como para el uso de los materiales de construcción utilizados en el proceso de materialización de la obra arquitectónica o civil.

Intervienen en esta definición:

- La dirección técnica, o sea quien determina qué técnica se utilizará en cada situación del proceso, para garantizar el logro de los objetivos en términos de calidad global.
- Los operarios de equipos, quienes tienen a su cargo el transporte o transformación de materiales por medios mecánicos.
- Los obreros o técnicos, que son quienes tienen la destreza para el uso de las herramientas y la aplicación de los materiales en la labor de producción del “objeto” (arquitectónico).

Como puede verse en lo anterior, las técnicas de construcción tienen su ámbito de acción en la obra, pero aparecen en escena a partir del momento en el que inicia la toma de decisiones, por parte de la dirección técnica, sobre cuál o cuáles técnicas hay que utilizar en una determinada situación.

La toma de decisiones pertenece a la etapa de prefiguración del proceso de construcción (proyecto constructivo, planos constructivos, diseño

de ejecución). Ya en la obra, operadores, obreros diestros, materiales, herramientas y proyectos, interactúan y se relacionan operativamente bajo la dirección de un superior, “el constructor”, quien orquesta el conjunto de recursos, incluidos los económicos y administrativos para garantizar el logro de los objetivos finales, determinados en el proyecto (arquitectónico) y planeados en el proyecto constructivo.

Proceso y programa

Es necesario hacer referencia, en primer término, a una frecuente confusión de conceptos que existe entre profesores y estudiantes, consistente en identificar el sistema constructivo con el procedimiento (o proceso) de construcción. También se ha encontrado una confusión similar al identificar el concepto de proceso con el concepto de programa, y vale la pena aclararlo.

Se entiende por “proceso” una serie de eventos debidamente articulados, donde cada uno se origina en el anterior y a su vez hace posible el siguiente, conformando una cadena de sucesos que constituyen el proceso de producción, o proceso constructivo para nuestro caso.

Puesto que este ordenamiento puede tener muy distintas concepciones, decimos que un proceso se puede “diseñar”, ya que diseñar es sinónimo de ingeniar, bien se aplique a un objeto físico o a un procedimiento de producción.

Ahora, se entiende por “programa” la asignación de tiempos y recursos a los eventos de un proceso; el programa no es un ejercicio creativo, sino un ejercicio matemático de cuantificación y distribución, que involucra en primer lugar la duración, y luego los recursos necesarios para llevar a cabo un proyecto o labor definida.

Entonces, debe quedar bien entendido que no se diseñan los programas, en tanto que los procesos sí son objeto de diseño. Los programas son esencialmente distribuciones en el tiempo; primero se diseñan los procesos y luego se someten a programación. Por tanto, quien no conoce el proceso no puede establecer un programa, y así, quien construye, debe primero conocer el proceso para luego programarlo.

REFERENCIAS

- Botero, R. (mayo de 1998). Documento de estudio inédito. Medellín.
- Carvajal, H. (2013). *El diseño de ejecución. Un planteamiento metodológico para la enseñanza de la planeación de obras a constructores, arquitectos e ingenieros*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Ching, F. (2004). *Guía de la construcción ilustrada*. Ciudad de México: Limusa Wiley.
- Escorcía, O. (2009). *Anatomía y fisiología de la edificación: tecnología de la arquitectura*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- González, J. L.; Casals, A. y Falcones, A. (2008). *Claves del construir arquitectónico. Principios, 1*. Barcelona: Gustavo Gili.
- González, M. (octubre de 1990). Documento de trabajo inédito. Departamento de Construcción y Recursos Técnicos para la Edificación, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (actualizado a junio de 1993).
- González, M. (mayo de 1997). Documentos de trabajo inédito. Departamento de Construcción y Recursos Técnicos para la Edificación, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (tomado de un documento previo del autor y actualizado).
- Gortari, E. (1983). *Metodología general y métodos especiales*. Madrid: Océano.
- Molina, C. y Prada, M. (julio de 1991). Documento de trabajo inédito. Departamento de Construcción y Recursos Técnicos para la Edificación, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Monjo C, J. (noviembre de 1986). Propuesta de evaluación de sistemas constructivos. *Informes de la Construcción*, 38(385), 193-219.
- Mumford, L. (1988). *Técnica y civilización*. Madrid: Alianza.
- Orozco, E. (2008). Notas sobre materiales, técnicas y sistemas constructivos. *Tecnología y construcción*, 24, 9-17.
- Osorio, C. (2002). *Revista Iberoamericana de Ciencia Tecnología e Innovación*. Recuperado de <https://www.oei.es/historico/revistactsi/numero2/osorio.htm#3a>
- Quintanilla, M. (1988). *Tecnología: un enfoque filosófico*, vol. 2. Madrid: Fundesco.
- Racionero, L. (1978). *Sistemas de ciudades y ordenación del territorio*. Madrid: Alianza.

Real Academia Española. (2001). Diccionario. Recuperado de <https://dle.rae.es/construcción>

Salas, J. (1981). *Alojamiento y tecnología: ¿industrialización abierta?* Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento.

Vélez, C. (2003). *Cerramientos en la edificación*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Capítulo 2

La tecnología en la arquitectura. Un método para el conocimiento de la edificación histórica

Henry H. Carvajal Jaramillo

Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia

INTRODUCCIÓN

El método que se propone en este capítulo es parte del resultado de una investigación más amplia¹ (Carvajal, 2018), que se origina de una investigación preliminar, en la cual el autor (Carvajal, 2017) realizó una revisión de tema sobre la tecnología en la arquitectura del periodo neogranadino en Colombia. En este proceso se revisaron 189 títulos, y se encontró que el 39% estaban dedicados a un edificio en específico, el 23% a la realización de análisis de la arquitectura de una región del país, el 15% fueron publicaciones que tratan la arquitectura neogranadina de una manera global, el 11% trata el tema de las influencias hispánicas y europeas en la arquitectura del periodo, el 8% son publicaciones dedicadas a la parte histórica y solo el 4% tratan el tema específico de lo tecnológico en las edificaciones construidas en el periodo analizado: siglos XVI al XVIII. Las publicaciones e investigaciones clasificadas en las temáticas de historia, influencias, generales y regionales, hacen referencia al aspecto de la tecnología solo en la denominación de los sistemas constructivos y materiales, cuando están describiendo los edificios.

Por tanto, si miramos las investigaciones que se han realizado sobre la primera expresión formal arquitectónica en Colombia, nos damos cuenta de que son pocos los autores que tratan el tema de la tecnología. Es solo a partir del 2000 cuando se empieza a investigar y publicar sobre sistemas constructivos específicos, pero se encuentran pocos trabajos serios sobre este asunto.

¹ Algunas de las afirmaciones consideradas en este capítulo son resultado de esta investigación principal.

En este capítulo se expone un método que permitió conocer la tecnología de un conjunto de edificios patrimoniales y realizar análisis por comparación, es decir, contrastar lo tecnológico en varias edificaciones de una misma época, de una misma región, de un mismo autor, etc.

Después de considerar varios métodos de evaluación tecnológica de sistemas constructivos e indagar sobre los principios de la arquitectura, se define el método que consta de varias etapas.

La primera etapa es la obtención de información. Para iniciar la evaluación de los edificios es necesario contar con la información histórica que facilitará el proceso, ya que existen variables que solamente se pueden conocer a través del estudio histórico, proceso que básicamente consiste en la aplicación del método de investigación histórica. Luego se define una escala de análisis que depende de la información obtenida en la fase anterior; en este método se asume una escala general. Posteriormente se define una herramienta que permite valorar los factores a evaluar con sus variables e indicadores, que se debe fundamentar en los principios que han de regir la arquitectura y todos sus elementos espaciales o materiales. Aquí entenderemos cómo lo espacial no se puede desligar de lo tecnológico. Para la definición de algunos indicadores y su forma de aplicación, se recurre a parámetros definidos en los tratados de construcción de la época en que fueron construidos los edificios. Finalmente se define una escala de valoración cuantitativa para cada uno de los indicadores que posteriormente facilitará su análisis para el caso de las comparaciones regionales, temporales o de autor.

Este método fue aplicado para un conjunto de templos conventuales masculinos en el Nuevo Reino de Granada, construidos durante los siglos XVI y XVIII, edificios que han sido investigados por el autor, y que dio como resultado la generación de nuevo conocimiento con respecto a la tecnología en la arquitectura religiosa en Colombia. Igualmente, el método podrá ser utilizado para cualquier tipo de edificación de cualquier época, mediante la adaptación de las variables según sea el caso de investigación. No es objeto de este artículo presentar los resultados de la investigación principal, solo el método utilizado para demostrar las hipótesis de esta.

MODELOS DE REFERENCIA

Para la evaluación histórica de la edificación existente es necesario crear un método que permita, partiendo de la información conocida, dar de una manera concreta y demostrable solución a los aspectos tecnológicos de la edificación. Para tal fin se revisaron tres métodos que han sido publicados y aplicados; uno español, desarrollado por Juan Monjo Carrió; otro argentino, desarrollado por Mariana Enet, y uno colombiano, propuesto por Luis Humberto Casas. Estos métodos están orientados a la evaluación de sistemas constructivos, para la definición de la viabilidad en cuanto a la adaptabilidad y aplicación en desarrollos masivos de vivienda.

Juan Monjo Carrió (1986) propone un método para la evaluación funcional, técnica y económica de un sistema constructivo. Parte de las exigencias funcionales para evaluar su aplicabilidad en una determinada situación geográfica y económica.

Dentro de la respuesta funcional considera, basado en el concepto de Vitruvio, aspectos tales como la integridad, la utilidad y la belleza (*firmitas, utilitas y venustas*); para cada uno de ellos define las variables necesarias que permitan conocer la posibilidad alta, media o baja de cumplir con estos aspectos, igualmente la adecuación geográfica y económica alta, media o baja para la situación específica.

Dentro de la respuesta tecnológica se evalúan aspectos como los condicionantes constructivos, el perfil tecnológico y el análisis de subsistemas. En cuanto a los condicionantes constructivos, se consideran la posibilidad de su existencia, la aceptación socioeconómica, el nivel de control de calidad y posibilidad de su continuidad alta, media o baja para cada una de las fases de producción del sistema: materiales, fabricación, transporte, montaje y mantenimiento. En cuanto al perfil tecnológico, es necesario analizar la incidencia de la mano de obra en cada una de las fases del proceso constructivo estimada en porcentaje: fabricación, transporte, montaje y mantenimiento. Respecto al análisis de subsistema, se recomienda evaluar en qué fase se incorpora cada uno de ellos y si es propio o ajeno.

Finalmente, la respuesta económica pretende considerar la reacción del sistema en estudio a las condiciones económicas del lugar, teniendo

en cuenta las circunstancias locales y los objetivos económicos en cada una de las fases del proceso, expresadas en coste, tiempo y calidad; donde se califica la alta, media o baja planificación político-económica, el poder adquisitivo como respuesta a la situación socioeconómica, el nivel industrial y el nivel de exigencias culturales.

Mariana Enet (1997) propone un método de evaluación técnico-funcional comparativo para la selección de tecnologías. Es un método que permitirá hacer un análisis paralelo de las tecnologías con el fin de descubrir la alternativa tecnológica más apta. Está basado en los conceptos de tecnología: “la tecnología no es solamente un hecho constructivo sino que, por el contrario, es válida en función de su respuesta a un medio dado y en relación a la respuesta técnica funcional que se espera de ella” (p. 18); prevención y optimización: “es un conjunto de métodos y herramientas que permitirá prevenir las patologías desde el inicio de la producción, diseño, montaje y mantenimiento” (p. 18). Define los siguientes pasos para la evaluación: determinar la tecnología de referencia que se encuentra posicionada; realizar un diseño equivalente en las dos tecnologías; realizar una descripción y análisis detallado de los dos sistemas; introducir datos en las fichas y hacer cálculos del nivel de eficiencia de cada sistema. Los parámetros que usa para la comparación deben ser todos los del proceso productivo: fabricación, transporte, montaje, calidad y mantenimiento. De estas fases se sacan las variables con sus respectivos indicadores, que se calculan en porcentajes que finalmente dan una calificación global de la variable que define la capacidad o aptitud alta, media o baja de los sistemas evaluados.

Humberto Casas (2004) desarrolla un método como elemento básico para la evaluación, validación y selección de sistemas constructivos. Este método califica su comportamiento ante parámetros de orden ambiental, tecnológico y socioeconómico, con el fin de determinar la viabilidad, así como sus deficiencias, sus condiciones básicas de calidad y su aplicación, para elegir finalmente y utilizar el que mejor responda a las necesidades de los usuarios y al contexto. Es un método basado completamente en el que presenta Juan Monjo Carrió; considera los mismos parámetros de evaluación, pero involucra más variables.

Según Casas, se deben llevar cuatro acciones en el proceso de evaluación y considera como evaluación:

valorar, fijar valor a una cosa, emitir un juicio de valor de algo y de alguien, comprobar que algo responde a unos parámetros de acuerdo a sus características intrínsecas; por lo tanto en la evaluación hay que comprobar que el material, componente, elemento o sistema tiene un comportamiento tal, que le permite garantizar sus condiciones o atributos en el tiempo. (2004, p. 8)

Esas cuatro acciones son: definir qué se quiere evaluar y cuál es el propósito de la evaluación; luego obtener la información directa e indirecta, en relación con los aspectos que se quieren evaluar; después se pasa al establecimiento de parámetros de medición por medio de una guía, “la cual está constituida por una serie de preguntas o ítems donde se recoge información acerca de los aspectos a evaluar, la incidencia de estos en su comportamiento para a partir del establecimiento de criterios, calificarlo, hacer comparaciones, examinar tendencias” (Casas, 2004, p. 10); por último se emiten juicios de valor que permiten demostrar el grado de cumplimiento, dependiendo de su incidencia en el conjunto.

Es claro que los métodos anteriores no se pueden aplicar directamente a los edificios históricos, por varias razones: para el caso de los templos, se trata de edificios monumentales que están destinados a otros usos diferentes al de vivienda, que no se pueden aplicar masivamente y deben obedecer a unas condiciones de oferta y demanda muy distintas. Se trata de construcción histórica, es decir, edificios construidos en unas condiciones locales y globales muy diferentes a las actuales en cuanto a conocimiento, sistemas de comunicación, transporte y tecnología aplicada; y finalmente, se cuenta con una información fruto de una investigación histórica cuya calidad y suficiencia depende de lo juiciosos que hayan sido en su momento quienes participaron en el registro de la construcción e intervención del edificio, y la fortuna que se haya tenido en la consulta de dicha información en los diferentes archivos históricos. Por tanto, los modelos consultados aportan ideas importantes que se deben tener en cuenta para el diseño de un método que permita la evaluación y el conocimiento histórico de la edificación.

DEFINICIÓN DEL MÉTODO

Teniendo en cuenta lo anterior, será necesaria la construcción de una definición de sistema constructivo, adaptado y específico para los edificios que se quieran analizar. Se parte de la definición de sistema constructivo dada por Carvajal (2013, p. 7). Por ejemplo, para el caso de los templos conventuales masculinos construidos en el actual territorio colombiano durante los siglos XVI y XVIII, analizados en la investigación principal, entendemos como sistema constructivo patrimonial el conjunto de componentes, logrado a partir de materiales simples o elaborados propios de la época, que relacionados entre sí cumplen funciones de integridad, utilidad, belleza y eficiencia técnica, dándole al edificio un valor de uso, arquitectónico, documental o significativo, por lo cual la humanidad ha decidido conservarlo. Más adelante entenderemos por qué se deben incluir estas funciones.

1. Obtención de la información

Según Casas, el primer paso para la evaluación es conseguir la información necesaria sobre el sistema, el medio físico y el proyecto (2004, p. 17). Por tanto, para iniciar la evaluación de edificios patrimoniales o históricos es necesario contar con la información histórica que facilitará el proceso, ya que existen variables que solamente se pueden conocer a través del estudio histórico. Para el caso del conocimiento del proceso constructivo del edificio y todas las variables relacionadas con este, la información se obtiene de los archivos históricos nacionales y regionales, archivos institucionales o archivos personales, y para el caso de los sistemas constructivos la información se obtiene de los estudios para la intervención en archivos de las entidades públicas encargadas del patrimonio o privadas encargadas de su intervención.

Es de anotar que, debido a la temporalidad de las empresas privadas y a que muchas veces no cuentan con sistemas de archivo adecuados, es mucho más difícil llegar a estas fuentes, pero es sabido que todas las entidades privadas en el caso de la intervención del patrimonio deben rendir cuenta de todo su trabajo a las entidades estatales o públicas, donde los registros históricos son más asequibles.

En este caso será necesario conocer las diferentes entidades que, a través de la historia, se han encargado del manejo de los edificios patrimoniales, ya que estas cambian a través del tiempo y no siempre los archivos se pasan de una entidad a otra. Y algunas veces son varias las que se hacen cargo de ellos, por tanto, será importante detectar cuál de las entidades estaba a cargo del edificio en cuestión en el momento de sus intervenciones.

Por ejemplo, en Colombia en 1968, bajo el gobierno de Carlos Lleras Restrepo, se creó el Instituto Colombiano de Cultura (Colcultura) que funcionó como entidad descentralizada adscrita al Ministerio de Educación Nacional. Fue a través de Colcultura que se empezó a intervenir el patrimonio, pero muchas veces lo hizo a través del Ministerio de Obras Públicas o del Banco de la República. Luego el presidente Ernesto Samper impulsó la Ley General de Cultura, aprobada el 7 de agosto de 1997, en la cual se liquidó Colcultura y se creó el Ministerio de Cultura. A partir de entonces toda intervención debe contar con el aval y acompañamiento de este ministerio. Cada una de estas entidades cuenta con su centro de documentación y aquellas que ya no existen como Colcultura enviaron sus archivos a la Biblioteca Luis Ángel Arango o al Archivo General de la Nación.

Otra fuente de información es el mismo edificio, ya que este, a pesar de que puede ser el resultado de las transformaciones que se hayan hecho a través de su historia, sirve en alguna medida para corroborar la información obtenida. Adicionalmente, si es posible, la realización de ensayos no destructivos y exploraciones para el conocimiento de la materialidad del edificio se torna mucho más importante como fuente de información, en los casos en que sea viable y no se cuente con la información en los estudios previos para las intervenciones que se le hayan hecho. Sin embargo, cabe señalar que el método podrá ser utilizado tanto para edificios existentes como para aquellos que se hayan perdido en la historia por las transformaciones de las ciudades y el poco interés que se le haya dado a la conservación del patrimonio en un momento dado. Aunque en este caso el trabajo se torna mucho más difícil ya que se requiere de muy buena información sobre el edificio demolido.

2. Establecimiento de la escala de análisis

Enet involucra un aspecto fundamental en la evaluación y es la escala de análisis (1997, p. 19). Antes de iniciar la evaluación es importante definir el nivel de análisis, que puede ser general o exhaustivo. Por ejemplo, para el caso de edificios patrimoniales estará determinado por la información existente o hallada en el proceso de investigación histórica y en la posibilidad de contar o no con estudios técnicos o la realización o no de ensayos no destructivos y exploraciones que den cuenta del edificio en investigación.

Se pueden definir diferentes escalas de acuerdo con la información obtenida y el alcance de las herramientas que se tienen, partiendo desde análisis generales, es decir, hacer una evaluación de todos los aspectos, hasta análisis detallados de un solo aspecto, de acuerdo con el objetivo que se quiere lograr y la información que se quiera extraer.

3. Aspectos a evaluar

Una vez se tiene la información y la escala de análisis, es necesario definir los aspectos a evaluar, las variables y los indicadores. Estos últimos orientados hacia lo que se quiere resolver con respecto al objetivo de la evaluación. Por ejemplo, en los métodos de referencia se plantea como objetivo de la evaluación del sistema constructivo “por un lado la posibilidad de su obtención y, por otro, su adecuación al medio físico y social en el que se pretende utilizar” (Monjo, 1986, p. 8). “Nivel de eficiencia relativo para la producción masiva y calidad final obtenida” (Enet, 1997, p. 19). “Posibilidades arquitectónicas y estructurales que garanticen buenos niveles de seguridad y confort de las edificaciones” (Casas, 2004, p. 17). Es decir, será necesario definir unos factores y crear unos indicadores y variables que nos permitan generar nuevo conocimiento y resolver los objetivos que se tengan en la investigación.

Según Juan Monjo (1986, pp. 7-8), la arquitectura es un “arte funcional”, es decir, que trata de obtener edificios que encierren espacios que se van a habitar y que para ello deben responder a un nivel mínimo de funcionamiento de acuerdo con las exigencias de uso. Este funcionamiento estará condicionado por el sistema constructivo, que debe

poder adecuarse al entorno geográfico y climático. Por otra parte, en su proceso de producción hay que distinguir cuatro grandes fases: la fase de diseño, la de producción, la de transporte y la de montaje, condicionadas por el sistema constructivo y sus exigencias tecnológicas referidas al nivel de preparación de la mano de obra, nivel industrial requerido y nivel de mantenimiento necesario, entre otras. Estos dos aspectos, funcional y tecnológico, tienen una gran incidencia y están supeditados a la economía que establezca y exija el sistema.

De acuerdo con lo anterior, cualquier evaluación deberá responder a estos tres elementos: funcional, tecnológico y económico. Pero para efectos de la evaluación de sistemas constructivos patrimoniales será necesario tener en cuenta el concepto de monumentalidad y más aun cuando se trate de edificios religiosos o gubernamentales donde a través de ellos se quiere mostrar atributos de significado como divinidad, grandeza, poderío, entre otros. Aquí cabe señalar que la arquitectura monumental expresa una función de arte, cultura, necesidades sociales, mecenazgo y tecnología (Mark, 2002, p. 15)

La función de la arquitectura la concretó Vitruvio en su libro primero al establecer las tres características definitorias de la misma *firmitas, utilitas y venustas*. Estas tres características han definido la arquitectura a lo largo de los siglos y siguen plenamente aceptadas (Monjo, 1986, p. 8). Se trata de definir la respuesta ambiental de los sistemas constructivos según la integridad, utilidad y belleza (Casas, 2004, pp. 21-22). Este factor es llamado por Casas como “lo ambiental” fundamentado en que “la descripción del medio físico y los diferentes factores que intervienen en él se constituyen en elementos fundamentales para evaluar la incidencia que estos tienen en la edificación y cómo ésta se comporta ante ellos en el tiempo” (Casas, 2004, p. 21).

4. El método de González, Casals y Falcones

Por otra parte, los autores de *Claves del construir arquitectónico* (González, Casals y Falcones, 1997, pp. 15-16), partiendo de estas tres características plantean cinco fines o principios que han de regir la arquitectura y todos sus elementos espaciales o materiales: la adecuación del espacio

al uso previsto, la adecuación del ambiente al uso previsto, la integridad de las personas que habitan y del mismo edificio, la conveniencia estética y finalmente la eficiencia de su producción.

Esta consideración resulta más integradora, en la medida en que no separa lo “tecnológico” de lo funcional, incluyendo en este elemento la parte de la producción. Y resulta más conveniente en la medida en que algunos aspectos de lo funcional responden también al tema tecnológico, como son la utilidad y la integridad. Aspectos tales como el confort ambiental, que pertenecen al principio de utilidad, y las acciones físicas, mecánicas y climáticas, que pertenecen al principio de integridad, condicionan la respuesta constructiva del edificio, es decir, el aspecto tecnológico. Incluso estos consideran, dentro de la funcionalidad o uso, la definición de la forma como el primer embate gravitatorio, que pertenece al principio de la utilidad.

Es necesario pues, en aras de no continuar con la separación que a través de la historia se ha hecho del quehacer arquitectónico y el quehacer constructivo, asignándole erróneamente a este último el aspecto tecnológico, considerar este último concepto de función de la arquitectura para la definición de los principios y variables a evaluar. Queda por tanto añadir el aspecto socioeconómico utilizado en los modelos de Monjo, Casas y Enet, que estaría dentro del principio de eficiencia de la producción considerado por González, Casals y Falcones.

Los medios que responden a todos estos elementos, fines o principios son el espacio y la materia. Para efectos de este método, no se tendrán en cuenta los aspectos que tienen que ver con el espacio como expresión arquitectónica. El espacio es una característica de otro orden de análisis y en algunos casos ya ha sido ampliamente investigado. Por lo mismo no se considera la conveniencia estética. Por tanto, la materia es de lo que nos ocuparemos, lo que es lo mismo que los elementos construidos.

Los principios se traducen en numerosas y diversas condiciones, que denominaremos requisitos y que, según sea su naturaleza, dependen de una o más variables. La satisfacción de los requisitos, medidos según sus variables, exige de los edificios, sus partes (que también denominaremos subsistemas constructivos) y sus elementos, unos modos

de comportamiento genéricos, que denominamos exigencias. Para saber si una solución constructiva, es decir, una manera determinada de construir un elemento, un subsistema o un edificio es la adecuada para esas exigencias, debemos conocer las prestaciones que es capaz de aportar (el elemento, el subsistema o el edificio) frente a cada exigencia en concreto; la prestación habrá de ser igual o superior a la exigencia. Las prestaciones son consecuencia de las características de las formas y los materiales que constituyen los elementos constructivos. Y estas características de formas y materiales dependen de los procesos de producción que las hacen posibles (González, Casals y Falcones, 1997, p. 15).

5. Principios y variables a evaluar

Teniendo en cuenta lo que se dijo anteriormente sobre los puntos del proceso de evaluación: obtención de la información y escala de análisis, y, atendiendo a lo que se quiere evaluar y los edificios a los cuales está orientada, en este caso edificios patrimoniales y más concretamente considerando el concepto de monumentalidad, se definen a continuación los principios y variables a tener en cuenta. Para efectos de este método se considerará primero la utilidad, luego la integridad y por último la producción.

5.1 La utilidad

El término utilidad (*utilitas*) está referido al uso, es decir a la posibilidad de que la edificación pueda llevar a cabo las funciones para las cuales se construyó o se acondicionó; lleva implícito el concepto de habitabilidad, que implica dar respuesta a las necesidades humanas de protegerse frente al medio, en unas determinadas condiciones de uso y confort (Casas, 2004, p. 26).

Juan Monjo divide este aspecto en dos: la funcionalidad y el confort, o lo que es lo mismo en González, Casals y Falcones, la adecuación del espacio y la adecuación del ambiente.

La adecuación del espacio se refiere al “conjunto formado por los diferentes espacios que componen el edificio, definido por sus características geométricas (dimensiones, proporciones, etc.) y la interrelación que

tienen mediante otros espacios de conexión o de recorrido entre ellos” (González, Casals y Falcones, 1997, p. 17). Esto depende del diseño que a su vez está definido por la estructura; por tanto, diseño y estructura son variables que se deben evaluar en este componente.

Juan Monjo y Casas consideran que la funcionalidad contemplará, además, la posibilidad de construcción progresiva, así como la autoconstrucción que presenta el sistema. La autoconstrucción implica la existencia de unas leyes dimensionales claras y simples y el uso de unas tecnologías constructivas sencillas y unos materiales locales o fáciles de obtener (Monjo, 1986, p. 10; Casas, 2004, p. 37).

Por ejemplo, para el caso de los templos construidos durante los siglos XVI y XVIII en el territorio que hoy es Colombia, y considerando las condiciones locales en el Nuevo Reino de Granada, la construcción progresiva es un requisito que se debe evaluar, ya que se sabe que es uno de los aspectos que caracterizó estos edificios. Las construcciones se hacían dependiendo de la disponibilidad de los recursos y atendiendo las necesidades de la comunidad religiosa y la población que se servía, sinónimo también de unas condiciones económicas precarias o no muy solventes.

Además, la autoconstrucción considerada dentro de este componente se referirá a la construcción teniendo en cuenta el conocimiento local que, por ejemplo, en el caso de los templos, se sabe que fue uno de los aspectos con los que no se contaba para la época, y que en muchos casos dio una mala respuesta². Aquí toman importancia los artífices y la evaluación debe orientarse a valorar la participación o no de personal calificado en el diseño y la construcción del edificio, lo cual se debe hacer en el componente de producción.

Para la medición de las variables que hacen referencia al confort, se debe tener en cuenta la normativa propia de la región o del país o, si no existe, lo más adecuado a las costumbres locales (Casas, 2004, p. 26). Es otro aspecto que debe adaptarse a las condiciones históricas de los

² Según investigación principal referenciada en la introducción.

edificios que se van a evaluar y al tipo de edificios, ya que no es lo mismo la evaluación del confort en un edificio de vivienda donde se hará la mayor parte de las actividades humanas, que un edificio religioso donde la ocupación no es permanente. En el caso de templos es evidente que la única solicitud de la materialidad era la formación del espacio y con esta la resistencia de sus elementos, por lo tanto, este aspecto no se deberá tener en cuenta en la evaluación³.

Espacio y estructura

Los elementos delimitadores del espacio han de ser desde el momento de su construcción estables frente a las acciones capaces de “derribarlos” que, con certeza total, actúan desde el primer momento, como las acciones gravitatorias. Aunque no son las únicas posibles, ya que los sismos y el viento también pueden comprometer la estabilidad, las acciones debidas a la gravedad terrestre son las que inciden de manera decisiva en la conformación del espacio (González, Casals y Falcones, 1997, p. 25). La respuesta mecánica a los embates gravitatorios quedará evaluada en el aspecto de integridad.

En el caso de los templos, teniendo en cuenta que históricamente los muros o paredes de fábrica cumplían simultáneamente el papel de estructura y el de delimitadores del espacio, el espacio y la materialidad o la estructura están íntimamente relacionadas, en la medida en que el logro de aquellos determina la masa de esta. En el mejor de los casos esta relación se da a través de la utilización de las reglas estructurales existentes en los tratados de construcción de la época⁴, otras veces están dadas por la tradición constructiva del lugar de emplazamiento o también por los conocimientos de aquellos que intervienen en la concepción y ejecución de los edificios. En el peor de los casos, en ausencia de las anteriores se puede dar por ensayo y error o por sobredimensionamiento de los elementos de la estructura. Para evaluar este factor, en este caso, se debe recurrir a las reglas de las proporciones que se usaban en la época.

³ Según investigación principal referenciada en la introducción.

⁴ Según investigación principal referenciada en la introducción.

Por ejemplo, en los templos abovedados el espacio está dado por la forma de la bóveda en su nave central, y esta definirá el espesor del estribo que se materializa en el grueso de los pilares o el ancho de los contrafuertes que forman las capillas o naves laterales. Toda la seguridad de la obra depende de los estribos; una bóveda mal proyectada se hundirá en el momento del descimbrado; si fallan los estribos toda la construcción se viene abajo. Así, el dimensionado de los estribos ha preocupado a los constructores desde la más remota antigüedad. Tradicionalmente estos usaban reglas estructurales y el conjunto de reglas y sus rangos de aplicación constituían, en cada época, la “teoría de estructuras”. La teoría se basaba en un conocimiento de las propiedades fundamentales de las estructuras de fábrica adquiridas por la experiencia de la construcción. Aunque esta situación cambia a finales del siglo XVII, cuando la ciencia de la mecánica adquiere un desarrollo suficiente, la pregunta no se modifica: el objetivo es proyectar una bóveda y, sobre todo, un estribo que resista su empuje con seguridad suficiente. Por supuesto, los resultados finales no deberían ser muy diferentes de los obtenidos aplicando las reglas antiguas, que habían demostrado sobradamente su validez (Hernando y Huerta, 1998). En la anterior situación habría que recurrir a la aplicación de la regla geométrica del gótico para el cálculo de los estribos. Por tanto, esta regla se aplicaría a los templos abovedados, donde se definiría cómo su aplicación o no, contribuyó a la formación del espacio interior, y se demostraría el conocimiento técnico de sus artífices.

Por otro lado, no cabe duda de que la elección de cubiertas de madera para templos a través de la historia estuvo influenciada por la relativa rapidez con la que se levanta la construcción, además de ser más económica. Adicionalmente, mediante la eliminación del gran peso y los empujes asociados con dirección exterior que provocan los componentes del pesado abovedado de fábrica, se podía reducir en gran medida el espesor de los muros de los templos cubiertos con madera. Mientras las luces de la base de las cerchas se mantengan sin deformarse, el viento, las cargas sísmicas y los movimientos de la cimentación son el único origen de cargas laterales que actúan sobre los muros. Este tipo de edificios presenta largos muros paralelos sin contrafuertes, que se cruzan con

otros transversales que arriostran. La estabilidad lateral se mantiene principalmente mediante los muros exteriores, y mediante las cerchas de cubierta situadas sobre las naves laterales, que ayudan a asegurar los muros que se elevan por encima del claristorio, con el fin de conseguir estructuras firmemente arraigadas (Mark, 2002, p. 112). En este caso se podrían aplicar perfectamente las fórmulas de Rondelet, en las que el espesor de los muros está dado en función de su altura, la luz entre muros en la nave central y la altura del arriostramiento de la cercha de las naves laterales (1881).

Otras variables que se deben evaluar en el espacio y la estructura son la eficiencia espacial del sistema estructural y la eficiencia estructural de la masa construida, teniendo como referencia el sistema de comparación propuesto por González y Casals (2002).

La eficiencia espacial del sistema estructural es uno de los valores más objetivos de comparación de este factor, es decir, la cantidad de espacio conseguido en relación con los medios utilizados (González y Casals, 2002, p. 89); por ejemplo, en el caso de los templos se hace relacionando el área aferente de un soporte con el ancho de este. La relación de masa y vacío nos indicará la eficiencia espacial del sistema estructural utilizado, necesario para sostener el sistema de arcos y bóvedas o arcos y cubierta de estructura de madera que lo cubre. De esta forma, el indicador estará relacionado también con la percepción espacial. Un valor alto en este indicador demostrará una mayor eficiencia del sistema estructural.

En cuanto a la eficiencia estructural de la masa construida, se trata de valorar la masa necesaria para conseguir que la estructura sea estable. Para el caso de templos se traduce en la necesidad de contrafuertes que correspondan a la proporción entre la altura de la nave central y la de las laterales (González y Casals, 2002, p. 90). O lo que es lo mismo para los templos con cubierta en estructura de madera, el ancho de muro o pilar necesario.

Para el caso de templos, a continuación se presenta la tabla 1, con cada una de las variables que nos permitirán evaluar el espacio en función de la estructura; cada variable presenta unos indicadores que se puntuarán con cinco puntos acumulables, siendo 0 el valor más desfavorable, de donde resulta que el puntaje máximo de este factor es 30.

Tabla 1. Modelo condicionante funcional - Espacio y estructura

EDIFICIO			
CONDICIONANTE FUNCIONAL			
VARIABLE: ESPACIO Y ESTRUCTURA			
APLICACIÓN DE REGLAS PARA LA CONFIGURACIÓN DEL ESPACIO			
		Calificación del indicador	TOTAL
DIMENSIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES	Están por debajo de la regla	0	Sumatoria de los valores obtenidos en cada indicador
	Exceden la regla	5	
	Cumplen la regla	10	
EFICIENCIA ESPACIAL DEL SISTEMA ESTRUCTURAL	La relación entre el área aferente y el soporte necesario es menor de 2	0	
	La relación entre el área aferente y el soporte necesario es mayor de 2 y menor de 3	5	
	La relación entre el área aferente y el soporte necesario es mayor de 3	10	
EFICIENCIA ESTRUCTURAL DE LA MASA CONSTRUIDA	El ancho de muros o contrafuertes está por debajo de la regla	0	
	El ancho de muros o contrafuertes está por encima de la regla	5	
	El ancho de muros o contrafuertes coincide con la regla	10	

Fuente: elaboración propia.

Organización espacial

Como ya se dijo, por organización espacial “entendemos el conjunto formado por los diferentes espacios que componen el edificio, definido por sus características geométricas (dimensionales, proporciones, etc.) y la interrelación que tienen mediante otros espacios de conexión o de recorrido entre ellos” (González, Casals y Falcones, 1997, p. 17). Para el caso de los templos el espacio está dado por la definición de la estructura del edificio, pero también es cierto que esa definición corresponde a un plan de necesidades o a una idea básica en la que se consideran el tipo de edificio a diseñar y las necesidades de sus usuarios. Para este caso no se requiere ahondar en las características

tipológicas o necesidades de un edificio religioso de la época y tampoco hacer un estudio de proporciones. Lo que sí se puede evaluar son algunas variables del proceso constructivo y del resultado final del edificio que inciden en la organización espacial.

Una de las variables es la existencia o no de un diseño o una concepción inicial, ya que esto nos dará indicios del saber y el patrimonio tecnológico con que contaban sus artífices. Es difícil evaluar la existencia de un plano en la época o un diseño para el caso de los edificios antiguos, ya que no se puede saber con certeza si los hubo o no. En los casos más favorables se ha encontrado e identificado el diseño original del edificio, en la mayoría de los casos no, lo que no siempre quiere decir que no haya existido. Puede que hasta el momento no se haya encontrado o que lamentablemente se haya destruido en algún momento de la historia. En estas circunstancias será necesario hacer uso de datos históricos como la actuación de un artífice capacitado o con experiencia, las etapas constructivas o construcción progresiva, la coordinación o no de sus espacios y el tiempo de construcción del edificio, ya que las tres primeras variables nos dan indicio de la existencia o no de un diseño inicial, y la última, la permanencia de un diseño original en el tiempo. Estas variables nos ayudarán a evaluar la organización espacial del edificio y con ello el saber constructivo de sus artífices.

Para el caso de templos, a continuación, se presenta la tabla 2 con cada una de las variables que nos permitirán evaluar la organización espacial. Cada variable presenta unos indicadores que se calificarán con cinco puntos acumulables, siendo 0 el valor más desfavorable, de donde resulta que el puntaje máximo de este factor es 45.

Tabla 2. Modelo condicionante funcional - Espacio diseño

EDIFICIO			
CONDICIONANTE FUNCIONAL			
VARIABLE: ESPACIO DISEÑO			
	Calificación del indicador	TOTAL	
EXISTENCIA DE PLANO	No existe o no se ha encontrado plano original del templo	0	Sumatoria de los valores obtenidos en cada indicador
	Existe plano original del templo	5	
ACTUACIÓN DE ARQUITECTO CONSTRUCCIÓN PROGRESIVA COHERENCIA ENTRE LAS ETAPAS	No se conoce participación de arquitecto en la obra	0	
	Se conoce actuación de arquitecto en parte de la obra	5	
	Se conoce actuación de arquitecto en casi toda la obra	10	
	El templo se construyó por etapas	5	
	El templo se construyó en una sola etapa	10	
	Hay problemas en la coherencia entre las etapas	0	
	Hay coherencia espacial, pero no coherencia en los huecos de la fábrica	5	
	Hay coherencia espacial completa	10	
TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN	Inicio	Más de 100 años	0
	Terminación	Entre 50 y 100 años	5
	Años	Menos de 50 años	10

Fuente: elaboración propia.

5.2 La integridad

Para iniciar tomaremos la definición de Monjo en su método de evaluación, retomada por Casas.

La integridad expresará la capacidad que tienen los componentes y elementos del sistema para comportarse ante eventos sísmicos, de mantener sus características físico-mecánicas ante la acción, lenta pero continua, de los agentes naturales, que van, desde las cargas mecánicas debidas al propio peso [...] hasta las acciones de toda índole producidas por los agentes climáticos. (Monjo, 1986, p. 8; Casas, 2004, p. 22)

González, Casals y Falcones consideran la integridad como una conservación de la utilidad; “[...] la utilidad ha de ser duradera y segura para los usuarios” (1997, p. 109), y no solamente consideran la conservación de la materialidad del edificio y sus condiciones de confort, sino también la integridad de las personas que lo habitan, es decir, lo que se puede llamar la seguridad de uso. Para efectos de edificios como los templos y un nivel de análisis general, no es necesario considerar las condiciones de confort.

Los riesgos o la pérdida de la integridad de los edificios están dados por acciones que la afectan. Consideraremos para la evaluación del conocimiento tecnológico o la respuesta tecnológica en la arquitectura patrimonial, las acciones mecánicas de las cargas permanentes de la propia estructura y las acciones físicas de los sismos y del agua. Estas las llamaremos respectivamente respuesta mecánica y respuesta física al agua.

Respuesta mecánica

La respuesta mecánica se refiere a la respuesta de la estructura para mantener su propia integridad frente a las cargas permanentes de ella misma. “Las fuerzas que actúan desde el primer momento sobre el edificio se rigen por la ley de la gravitación universal y son consecuencia de la atracción que ejerce la masa de la tierra sobre las masas del edificio” (González, Casals y Falcones, 1997, p. 32).

En el componente de utilidad se consideró la concepción estructural del edificio en el sentido de que esta responda a unas reglas que definen el espacio. Estas mismas reglas determinan la estabilidad de la estructura y, aunque ya quedaron evaluadas, es necesario hacer una

nueva valoración, ya no de su definición, sino de su conservación, es decir, establecer si estas reglas o principios tenidos en cuenta para conformar la estructura de los edificios fueron suficientes y el edificio pudo mantener su integridad ante las cargas permanentes de su propia estructura.

La evaluación se hará teniendo en cuenta los datos encontrados en los estudios históricos y en los estudios técnicos, con relación a los reprocesos por colapso durante la ejecución, los colapsos durante el tiempo de servicio y los reforzamientos a través del tiempo por mal comportamiento estructural de sus elementos. Estos dos últimos aspectos se deben considerar solamente durante un periodo próximo definido. Esto lo explica el hecho de que es difícil evaluar el estado de grietas o separaciones de los componentes de la estructura encontrados en el momento del estudio y registrados en los estudios técnicos de las recientes restauraciones, ya que no se puede establecer si obedecen o no a la respuesta mecánica o la respuesta física ante movimientos sísmicos. Se asume que independientemente del sistema constructivo utilizado, este debe responder al uso que se le dio como sistema estructural.

A manera de ejemplo se presenta la tabla 3 con cada una de las variables que nos permitirán evaluar la respuesta mecánica para el caso de los templos. Cada variable presenta unos indicadores que se calificarán con cinco puntos acumulables, siendo 0 el valor más desfavorable, de donde resulta que el puntaje máximo de este factor es 40.

Tabla 3. Modelo condicionante integridad - Acciones mecánicas

EDIFICIO			
CONDICIONANTE INTEGRIDAD			
VARIABLE: ACCIONES MECÁNICAS			
		Calificación del indicador	TOTAL
INTEGRIDAD GRAVITATORIA DURANTE EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN	Colapso de muros	0	Sumatoria de los valores obtenidos en cada indicador
	Colapso de arcos	5	
	Colapso de armaduras de cubiertas, bóvedas o cúpulas	10	
	Estabilidad gravitatoria de la estructura	15	
INTEGRIDAD GRAVITATORIA DURANTE LA VIDA ÚTIL	Colapso de muros	0	
	Colapso de arcos	5	
	Colapso de armaduras de cubiertas, bóvedas o cúpulas	10	
	Estabilidad gravitatoria de la estructura	15	
NECESIDAD DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DURANTE LA VIDA ÚTIL	Reforzamiento de muros	0	
	Reforzamiento de cubiertas, bóvedas o cúpulas	5	
	No fue necesario ningún reforzamiento de la estructura	10	

Fuente: elaboración propia.

Respuesta física al agua

El interior de un edificio debe permanecer absolutamente seco siempre por dos razones: el ambiente producido por unos elementos constructivos húmedos en sus paramentos interiores es insano e incompatible con una comodidad mínima, y por otro lado, la humedad es un acelerante de procesos destructivos de los materiales (González, Casals y

Falcones, 1997, p. 53). Por tanto, es necesario evaluar la integridad de los sistemas constructivos del edificio ante la acción del agua, esto es, la penetración del agua lluvia al interior a través de las fachadas y las cubiertas, y la ascensión de aguas freáticas o de humedad del terreno a través de los elementos verticales de la estructura.

Por ejemplo, los sistemas de cubiertas en la construcción de los templos construidos antes del siglo XIX no poseen ningún componente que dé unas características estancas como se utilizan en la actualidad; más bien su buen funcionamiento lo garantizaban sus propios componentes: por un lado por la acción del ciclo humectación y secado, y por otro lado por las superficies, asegurando que el agua no permaneciera en ellas, evitando así el paso al interior, con la ayuda de factores como la pendiente y el solape de las tejas, para el caso de las cubiertas en teja de barro, y la forma e inexistencia de grietas de las superficies y el material de cubrición, en el caso de las cubiertas de fábrica. El mal funcionamiento de estos sistemas antiguos repercutía en el deterioro de las armaduras de cubiertas y de las mismas cubiertas de fábrica: en unas la madera y en otras los elementos de ornamentación interior, y con esto el detrimento de las condiciones de uso del edificio⁵. Por lo anterior sería necesario evaluar el sistema utilizado para cubrir el edificio y su relación con los regímenes de lluvias de las zonas en los que se construían, además de la necesidad de cambios de estructura de la cubierta como indicio del deterioro de sus armaduras y los acabados por problemas de filtración de aguas en el caso de las bóvedas de fábrica.

Dependiendo del caso, es preciso acceder a la descripción de la geografía física del periodo en el cual se construyó el edificio. Por ejemplo, en Colombia, para la época de la Nueva Granada se inicia con los relatos de los aborígenes, luego con las crónicas de los conquistadores, narraciones que vacilan entre la realidad y la fantasía. Durante los siglos XVI y XVII, los narradores van precisando sus conceptos, y aparecen así las primeras cartas geográficas, aunque todo hasta aquí

⁵ Según investigación principal referenciada en la introducción.

es fragmentario y deficiente. Solo en las postrimerías del siglo XVIII se puede hablar de investigación y análisis, con el trabajo del científico sacerdote español José Celestino Mutis y, con él, el primer sabio criollo, Francisco José de Caldas, con quien empieza el interés por la geografía científica, que refuerzan los grandes viajeros de esta época. A partir de 1827 empiezan las primeras publicaciones incluyendo la del general Tomás Cipriano de Mosquera, pero aún con muchos vaíos. Todo esto hasta que se crea en 1849, ya en época de la República, la Comisión Corográfica al mando del italiano Agustín Codazzi, a quien se le encargó la descripción y un mapa geográfico de todas sus provincias, trabajo que no se llegó a completar por la muerte de Codazzi (Comisión Corográfica, 1957, pp. 5-20). Por tanto, para el caso referido se tomaría la información sobre los regímenes de lluvias y temperatura contenidos en el estudio de la Comisión de 1849 y el trabajo anterior de Tomás Cipriano de Mosquera. Aunque no poseen los mismos datos para todas las regiones, los que presentan servirán para el análisis.

Para el caso de la ascensión capilar a través de la fábrica, por ejemplo, los sistemas antiguos no contaban como hoy con componentes que actuaran como barrera frente al agua del terreno o aguas freáticas; evitarla o no dependía de la utilización de materiales más o menos porosos en las primeras hiladas de los muros. Al respecto dice fray Lorenzo al referirse a los zócalos de las pilastras: “Estos de ordinario son de cantería, porque fuera de ser firmes, conservan con limpieza el edificio, recibiendo en sí lo que salpica el agua” (De San Nicolás, 1989, c. xxxiv, p. 85). No solamente el zócalo en piedra se convierte en una buena base de sustentación de los muros por ser una zona sometida a mayores presiones, sino que constituye una faja de menor capilaridad con respecto a los muros en tierra, ladrillo cocido o los muros mixtos (piedra y ladrillo cocido) o de piedra con mayor porosidad. Es sabido también que “el carácter de impermeabilidad de un tablón de cemento y mortero de cemento impide la transpirabilidad del terreno ocasionando humedades en los muros. Un sistema de piso en tablón cerámica y mortero de cal permite una fácil y rápida transpiración de

la humedad” (Gómez, 2004), evitando así que esta suba a través de los muros. Por ejemplo, para los templos, en todos los casos que se han estudiado se utilizaron pavimentos que permitían la transpirabilidad de la humedad, pero también en algunos casos se usaron materiales en la base de los muros que protegían el resto de la fábrica⁶. Por tanto, será necesario evaluar la utilización o no de un material en el sistema constructivo de muros que contribuya a minimizar la ascensión capilar y garantice la integridad de la parte baja del muro frente a la erosión física.

A continuación, se presenta la tabla 4, con cada una de las variables que nos permitirán evaluar la respuesta física al agua para el caso de templos. Cada variable presenta unos indicadores que se calificarán con cinco puntos acumulables, siendo 0 el valor más desfavorable, de donde resulta que el puntaje máximo de este factor es 40.

Tabla 4. Modelo condicionante Integridad - Acciones físicas agua

EDIFICIO			
CONDICIONANTE INTEGRIDAD			
VARIABLE: ACCIONES FÍSICAS AGUA			
		Calificación del indicador	TOTAL
FILTRACIÓN DE AGUA - SISTEMAS DE CUBIERTA UTILIZADOS	Fábrica sin protección en régimen de lluvias altos y temperaturas bajas	0	Sumatoria de los valores obtenidos en cada indicador
	Teja de barro en régimen de lluvias bajos y altos	5	
	Fábrica sin protección en régimen de lluvias bajos y temperaturas altas	5	
	Fábrica protegida con tejas en régimen de lluvias altos	10	

⁶ Según investigación principal referenciada en la introducción.

EDIFICIO			
CONDICIONANTE INTEGRIDAD			
VARIABLE: ACCIONES FÍSICAS AGUA			
		Calificación del indicador	TOTAL
FILTRACIÓN DE AGUA - FALLOS EN LOS SISTEMAS DE CUBIERTA	Reparaciones antes de 50 años	0	Sumatoria de los valores obtenidos en cada indicador
	Reparaciones entre 50 y 100 años	5	
	Reparaciones después de 100 años o sin reparaciones	10	
ASCENSIÓN CAPILAR - SISTEMAS DE MUROS UTILIZADOS	Sistema en tierra desde el cimiento	0	
	Sistema en tierra con sobrecimiento en piedra	5	
	Sistema en ladrillo desde el cimiento	10	
	Sistema en piedra + rafa de ladrillo desde el cimiento	10	
	Sistema en tierra con protección (zócalo en piedra + rafas de ladrillo)	15	
	Sistema en tierra o ladrillo o piedra + rafas de ladrillo con protección (zócalo en piedra)	20	

Fuente: elaboración propia.

5.3 La producción

Ya se ha dicho que no se puede asignar solo al componente tecnológico la parte de producción, pues como se ha visto, tanto en el componente de utilidad y de integridad existen variables que definen la tecnología en la arquitectura del edificio. Sin embargo, tanto Casas como Monjo

hablan de lo tecnológico solo al referirse a la eficiencia productiva, como la llaman González, Casals y Falcones.

El marco tecnológico se manifiesta como un conjunto de condicionantes que generan la definición conceptual del proceso y como instrumento que da lugar a la concretización y realización del producto. Este abarca materiales, equipos, herramientas, mano de obra, procesos, así como principios constructivos y estructurales, que interrelacionados entre sí constituyen un sistema, por lo tanto definen una forma de construir (Casas, 2004, p. 28).

Como se ve, Casas define muy bien el componente de producción al incluir en él materiales, equipos, herramientas, mano de obra y procesos, pero también incluye tanto principios constructivos como estructurales. Es necesario aplicar ciertos principios estructurales durante la producción, pero como ya vimos, los que se refieren a la definición de la materialidad del edificio quedan resueltos en la parte de utilidad. Hace falta incluir, además, las estrategias, los tiempos y los costos que también son variables que están involucradas en el proceso de producción. Según Monjo, el aspecto tecnológico solo debe responder a los condicionantes constructivos; a diferencia de Casas, no incluye el aspecto estructural y presenta una definición más completa y concreta. “Dependerá, básicamente, de las soluciones que presente el sistema a lo que podríamos llamar ‘condicionantes constructivos’, que son aquella serie de aspectos técnicos del proceso constructivo que marcan la pauta tecnológica del sistema” (Monjo, 1986, p. 11). Por su parte, González, Casals y Falcones hablan de eficiencia productiva como aquella fase en la que “un auténtico ejército de máquinas y de personas habrá de realizar multitud de acciones sobre los materiales existentes en la naturaleza, sometidos a las leyes de la economía” (1997, p. 145).

Para el caso de edificios históricos resulta un tanto difícil la evaluación de este componente, ya que la mayoría de las veces la información existente sobre el proceso de producción es muy escasa e incluso nula; por tanto, será necesario definir unas variables prudentes que permitan medir este componente y así evaluar el saber constructivo de sus artífices.

Los materiales

Este concepto se refiere a la materia prima para lograr cualquier edificio, por tanto es una de las variables que no se puede escapar en este componente; además, uno de los aspectos que generalmente se conoce en una investigación de un edificio histórico son los materiales utilizados en cada uno de los sistemas constructivos.

La evaluación se tendrá que centrar en la valoración de la complejidad técnica para la obtención y la preparación de dichos materiales antes de ser instalados en el edificio.

Por ejemplo, se ha dicho que la construcción neogranadina se caracterizó por hacer una adaptación de las técnicas constructivas peninsulares a los materiales existentes en el medio y a la escasa mano de obra⁷. Por tanto, será necesario fijar una escala de valor para los diferentes materiales utilizados en razón de su dificultad en la obtención y sus requerimientos en la preparación o elaboración para poder ser utilizados en cada uno de los sistemas del edificio. La tierra como material para la construcción de tapia pisada se podía hallar en el mismo terreno en que se estaba construyendo, y aunque requiere un proceso de preparación, no precisa de mano de obra especializada o al menos entrenada para esto, como tampoco herramientas o equipos especiales. Algo similar ocurre con la piedra, pero, aunque es un material que se usa conforme se encuentra en la naturaleza, necesita de unos procedimientos de extracción, labrado y transporte, en los que se deben utilizar herramientas y equipos especiales, además de personal capacitado o entrenado, y más si la piedra se utilizará como sillares, pues se tendrá que dar forma y cuidar unas características dimensionales definidas. El punto máximo lo ocuparían los ladrillos de arcilla y las tejas. Materiales que requieren de unos procesos de selección de arcillas, preparación, moldeo, secado, cocción y transporte, que se deben hacer en una planta o tejares, como se llamaban en la época.

Habrá que tomar decisiones de evaluación de acuerdo con la información existente, como por ejemplo no considerar los materiales utilizados

⁷ Según investigación principal referenciada en la introducción.

en los pavimentos en los templos neogranadinos, ya que en todos los casos, de acuerdo con los estudios, se utilizó el ladrillo tablón como material de acabado, y además no se conoce el momento en que este piso fue instalado, debido a que se ha encontrado una capa de argamasa de cal y arena como pavimento inicial, al cual se recurría para poner en funcionamiento los edificios, como en el caso de Santa Bárbara en Antioquia.

A continuación, se presenta la tabla 5 con cada una de las variables que permitirán evaluar el componente de materiales a la luz de la producción para el caso de templos. Cada variable presenta unos indicadores que se calificarán con cinco puntos acumulables, siendo 0 el valor más desfavorable, de donde resulta que el puntaje máximo de este factor es 40.

Tabla 5. Modelo condicionante producción - Materiales

EDIFICIO			
CONDICIONANTE PRODUCCIÓN			
VARIABLE: MATERIALES			
		Calificación del indicador	TOTAL
MATERIALES USADOS EN LA CIMENTACIÓN	Piedra	0	Sumatoria de los valores obtenidos en cada indicador
	Piedra + argamasa	5	
	Piedra + ladrillo + argamasa	10	
MATERIALES USADOS EN LA ESTRUCTURA MURARIA	Tierra	0	
	Tierra + piedra + ladrillo + argamasa	5	
	Piedra + ladrillo + argamasa	10	
	Sillar de piedra + piedra + ladrillo + argamasa	15	
	Sillares de piedra o ladrillo + argamasa	20	

EDIFICIO			
CONDICIONANTE PRODUCCIÓN			
VARIABLE: MATERIALES			
		Calificación del indicador	TOTAL
MATERIALES USADOS EN LA CUBIERTA	Teja de barro + caña+ barro	5	Sumatoria de los valores obtenidos en cada indicador
	Ladrillo + argamasa	5	
	Ladrillo + argamasa + teja de barro + caña + barro	10	

Fuente: elaboración propia.

Las técnicas constructivas

Para considerar esta variable será necesario definir lo que es técnica y delimitar su campo de evaluación para el caso de edificios históricos. Tomaremos la definición dada por González, Casals y Falcones: “técnica es un conjunto o sistema de acciones humanas intencionalmente orientado a la transformación de materiales en objetos concretos, con tal de conseguir de manera eficiente un resultado valioso” (1997, p. 146).

Es decir, para los edificios históricos, el conjunto de procedimientos que lograron transformar los materiales disponibles en sistemas constructivos y estos en edificios en una época determinada. Generalmente en todos los estudios históricos incluso de edificios de los años veinte del siglo xx, ha sido muy difícil encontrar con certeza datos sobre los procedimientos constructivos históricos, y muchos de los que hoy se conocen están basados en suposiciones o hipótesis a partir del análisis de los sistemas constructivos y de las etapas constructivas⁸. También es necesario aclarar aquí que no se puede confundir proceso constructivo con etapas de construcción, que sí son muy conocidas para la mayor parte de los edificios patrimoniales a través de la investigación histórica. Por ejemplo, para el caso de

⁸ Según investigación principal referenciada en la introducción.

los templos conventuales neogranadinos no se ha encontrado hasta el momento ningún documento que permita conocer las técnicas constructivas empleadas⁹, por tanto es una variable difícil de evaluar.

La construcción difiere de otros sectores industriales por el hecho de que frecuentemente cambia la localización de las operaciones, lo cual crea problemas de organización que pueden llegar a ser complejos. El flujo de producción se puede desglosar en dos eventos, la producción en fábrica o taller y la producción en obra, con sus respectivas actividades, de tal manera que permita su caracterización y evaluación (Casas, 2004, p. 37). De acuerdo con lo anterior, una variable que se puede utilizar para evaluar la técnica es la del flujo de producción en sentido de la capacidad técnica para producir el edificio en obra o in situ, ya que los procesos de producción en planta fueron evaluados en el componente de materiales.

La capacidad técnica queda reflejada en la complejidad de las actividades necesarias para lograr los elementos constructivos. Por ejemplo, la conformación de una cimentación a partir de piedra acomodada requiere solo de actividades de transporte de la piedra e instalación de esta en la excavación previamente realizada, y una en ciclópeo requiere de una actividad adicional y más compleja, como es la preparación de la mezcla para aglutinar las piedras. Las actividades involucradas en la construcción de los muros en todos los casos requieren de un transporte de materiales ya sean de canteras o plantas de producción, la preparación del mismo material o las mezclas para aglutinarlo, la instalación de andamios en todos los casos y formaletas si se trata de tapia pisada y por último la instalación o la conformación del muro, asumiendo que las tierras para la tapia se tengan que extraer de canteras en un lugar diferente a la construcción y que también requieran de un proceso de preparación como mezclado. La complejidad aquí radica en la especialidad técnica que se requiera para la ejecución, que está directamente relacionada con los formatos de las piezas que se utilicen para la conformación de los muros y con

⁹ Según investigación principal referenciada en la introducción.

ello lo expedito o no de los controles que se tengan que hacer en su ejecución. Es así como en la conformación de muros en tapia pisada la especialidad y el control resultan mucho más fáciles, ya que el ancho lo da la formaleta y el tamaño que de esta se maneja es grande, en relación con los muros en piedra no labrada con rafas de ladrillo, en los que se utilizan formatos más pequeños y se tiene que conformar un muro de tres hojas cuidando un plomo y la acomodación de piedras con caras planas en el exterior, pero donde la nivelación se va corrigiendo a partir de rafas de ladrillo; lo que no ocurre en el caso de los sillares de piedra, donde solo se tiene que dar el nivel en cada una de las hiladas. La complejidad aumenta cuando se trata de ladrillos cerámicos, ya que se debe macizar el muro con las mismas piezas, que son más pequeñas, cuidando la trabazón, el plomo y el nivel en cada una de las hiladas. Se deben tomar decisiones, por ejemplo, asumir como sistema el utilizado en la conformación del muro, ya que en todos los sistemas se emplea la mampostería en ladrillo para el tratamiento de vanos en jambas, dinteles y arcos.

En cuanto a las cubiertas, será necesario una clasificación según su complejidad en la construcción. Por ejemplo, actividades como encofrados, con mayores controles para dar forma y garantizar un buen trabajo estructural, hacen de las bóvedas y cúpulas de fábrica los sistemas más complejos utilizados en la construcción de templos con respecto a los sistemas de cubiertas inclinadas en madera y teja de barro.

Otra variable que se debe evaluar en este factor es el modo de construir, y para esto, en la construcción histórica se debe recurrir a los tratados de construcción de la época. Es dispendioso y difícil analizar la técnica constructiva en los tratados. Sin embargo se podría asociar a la forma de utilizar los materiales para la construcción de los edificios, que fray Lorenzo llama las formas de edificar; y en cuanto a esto dice por ejemplo, al referirse a la continuación del edificio después de construir los cimientos: “[...] resta el tratar como se ha de continuar el edificio el qual puede ser que suceda en una de quatro formas de edificar, ó de cantería, ó mampostería con pilares de ladrillo, o todo de ladrillo, ó de pilares de ladrillo con tapias de

tierra, que en edificios angostos es buen modo de edificar” (De San Nicolás, 1989, c. xxxv, p. 86), a continuación da una serie de recomendaciones para cada una de las formas de construir y las valora, lo que podemos utilizar para la evaluación de los templos. En el caso de la obra toda de ladrillo dice:

La obra de ladrillo es más sólida y maciza que las demás, aunque de muchas piezas más ayuntadas hacen un cuerpo sólido y macizo [...] La fortaleza de este material consiste en saberlo trabar y frogar. Lo uno se hace trabando el ladrillo por de dentro, como por defuera, y esto se hace hechando [sic] una hilada de enteros, y otra de medios, y así quedará el cuerpo trabado. El frogar se hace con abundancia de agua, revolviéndolo con la cal. Por defuera se traba cogiendo las juntas la mitad de cada ladrillo. (De San Nicolás, 1989, c. xxxv, p. 87).

A partir de lo anterior y para el caso de templos, sería necesario evaluar el conocimiento o no que tenían los artífices de los edificios históricos de estos modos de construir y cómo lo aplicaron.

A continuación, se presenta la tabla 6 con cada una de las variables que permiten evaluar el componente de técnica constructiva a la luz de la complejidad en los procesos de ejecución y el conocimiento de los modos de construir, según los tratados de la época para el caso de templos. Cada variable presenta unos indicadores que se calificarán con cinco puntos acumulables, siendo 0 el valor más desfavorable, de donde resulta que el puntaje máximo de este factor es 45.

Tabla 6. Modelo condicionante eficiencia productiva - Técnica constructiva

EDIFICIO			
CONDICIONANTE EFICIENCIA PRODUCTIVA			
VARIABLE: TÉCNICA			
		Calificación del indicador	TOTAL
SISTEMA DE CIMENTACIÓN	Piedra acomodada	0	Sumatoria de los valores obtenidos en cada indicador
	Ciclópeo	5	
SISTEMA MURARIO	Tapia pisada	0	
	Tapia pisada + fábrica en piedra	5	
	Fábrica en piedra	10	
	Fábrica en piedra + fábrica de ladrillo	15	
	Fábrica de ladrillo	20	
SISTEMA DE CUBIERTAS	Teja de barro	0	
	Bóveda de fábrica	5	
	Bóveda y cúpula de fábrica	10	
MODO DE CONSTRUIR SEGÚN TRATADOS	No corresponde a los definidos en tratados	0	
	Corresponde a los definidos en tratados con alguna variación	5	
	Corresponde a los definidos en tratados	10	

Fuente: elaboración propia.

El contexto socioeconómico

Todos los aspectos anteriormente tratados tienen una incidencia inmediata en el costo y, a su vez, se ven condicionados por este. Por ello, es necesario considerar también la respuesta que da el sistema en estudio a las condiciones económicas del lugar. Estas condiciones dependerán a

su vez de los contextos político-económico, socioeconómico, tecnológico y cultural. Para el análisis será necesario definir una forma de evaluar cada una de estas variables.

El contexto político-económico se refiere a las políticas públicas existentes para facilitar la construcción del edificio o, lo que es lo mismo, por ejemplo para los templos conventuales neogranadinos, el interés de los gobernantes o la misma Iglesia en su construcción, además del interés y la disposición de la comunidad a través del mecenazgo, que fue la principal fuente de financiación de este tipo de proyectos, o si se requirió de un gran esfuerzo por parte de los religiosos para lograr la construcción de sus casas a partir de las limosnas y superar las oposiciones, tanto de la real audiencia, como del clero y a veces de los mismos mecenas y la comunidad.

Una variable que puede indicar la existencia o no de una buena economía que haya favorecido particularmente la materialización del edificio histórico es el tiempo que tardó su construcción. Por tanto, será necesario relacionar el tiempo que duró la construcción, con el volumen construido. En el caso de los templos, se puede tener en cuenta solamente el volumen de fábrica construido, como estructuras murarias, bóvedas y cúpulas. Los templos en los que se logró construir mayor volumen de fábrica por año indicarán unas condiciones económicas muy favorables.

El contexto tecnológico se refiere al nivel técnico e industrial del lugar y su nivel de formación profesional, la existencia o ausencia de las técnicas en el lugar de implantación del sistema y la incidencia de la mano de obra en el proceso constructivo. Es necesario tener en cuenta la época de construcción del edificio, ya que en el caso particular de la Nueva Granada es sabido que no se contó con un saber constructivo previo para la edificación de las ciudades, es decir prehispánico; solo se contó con sistemas como el bahareque y los techos en paja, a los que sí se recurrió, pero de manera transitoria, y no fueron incluidos en la arquitectura monumental¹⁰. También será necesario considerar los

¹⁰ Según investigación principal referenciada en la introducción.

sistemas más comunes empleados en cada una de las regiones donde se construyeron los edificios, lo que nos indicará si se continuó con las técnicas empleadas hasta el momento o se incursionó en otras que requirieron de un conocimiento técnico y una capacitación previa de la mano de obra, lo cual se traduce en el mejoramiento de la capacidad técnica del lugar.

Hay muy pocos datos históricos que se refieren a la mano de obra utilizada en la construcción patrimonial; en el caso de los templos conventuales del periodo neogranadino, las pocas referencias con las que se cuenta nos indican que se emplearon esclavos e indígenas como mano de obra, dependiendo de la zona¹¹. Por tanto, en esta variable y en este caso es importante evaluar la existencia o no de un artífice instruido en la concepción y dirección de la construcción. Esto nos indica la capacidad técnica con que contaban los religiosos para la construcción de sus edificios.

El contexto cultural se refiere a los niveles de exigencia de los usuarios que inciden en la calidad final del edificio, variable que es difícil de considerar en edificios históricos monumentales.

A manera de ejemplo se presenta la tabla 7 con cada una de las variables que permite evaluar el componente de contexto socioeconómico a la luz de la situación político-económica, la situación económica, la complejidad de los sistemas constructivos utilizados y la capacitación de sus artífices. Cada variable presenta unos indicadores que se calificarán con cinco puntos acumulables, siendo 0 el valor más desfavorable, de donde resulta que el puntaje máximo de este factor es 45.

¹¹ Según investigación principal referenciada en la introducción

Tabla 7. Modelo condicionante eficiencia productiva - Contexto socioeconómico

EDIFICIO					
CONDICIONANTE EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN					
VARIABLE: CONTEXTO					
			Calificación del indicador	TOTAL	
POLÍTICO-ECONÓMICO			No existió interés de la Real Audiencia y el obispo en la construcción	0	Sumatoria de los valores obtenidos en cada indicador
			Existían conflictos con los mecenas	5	
			Se construía a partir de limosnas, capellanías, donaciones, rentas	10	
			Se construyó a partir de mecenazgos o recursos propios	15	
SOCIOECONÓMICO	VOLUMEN CONSTRUIDO POR AÑO	Volumen menor a 62 m ³ al año		0	
		Volumen entre 62 y 133 m ³ al año		5	
		Volumen mayor a 133 m ³ al año		10	
TECNOLÓGICO - SISTEMAS CONSTRUCTIVOS			Se construyó con sistemas iguales a los empleados en la zona	0	
			Se utilizó algún sistema diferente al de la zona	5	
			Se construyó con sistemas diferentes a los de la zona	10	
TECNOLÓGICO - ARTÍFICES CAPACITADOS			Construcción dirigida por frailes no arquitectos	0	
			Construcción dirigida por maestro del lugar	5	
			Construcción dirigida por frailes arquitectos	10	

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Para realizar un análisis tecnológico integral de la edificación histórica siempre será necesaria, como se expone en este capítulo, la definición de variables en sus aspectos de utilidad, integridad y producción, que estarán limitadas por la información existente sobre el edificio, tanto en sus estudios históricos como en sus estudios técnicos para la restauración y los informes de intervención.

La definición de escala de valores y la calificación cuantitativa de estas variables tecnológicas permite que, a través de lo existente, se obtenga información cualitativa inédita que se produce a través del análisis por comparación.

La aplicación del procedimiento para el análisis por comparación, propuesto en este capítulo, permite una evaluación tecnológica de los edificios históricos, lo cual es de vital importancia para conocer los criterios constructivos y estructurales aplicados, el avance progresivo en el saber constructivo, la influencia de la época y la localización geográfica en los criterios para la construcción, y las influencias que condicionaron su resultado.

Este método permite dar respuesta, de una manera concreta y demostrable, al conocimiento tecnológico de los edificios patrimoniales, conocimiento que estamos en deuda de investigar en el campo de la arquitectura y la construcción.

REFERENCIAS

- Carvajal J., H. (2013). *El diseño de ejecución: Un planteamiento metodológico para la enseñanza de la planeación de obras a constructores arquitectónicos e ingenieros civiles*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Carvajal J., H. (2017). La tecnología en la arquitectura. El caso de la arquitectura neogranadina: estado de la cuestión. *Apuntes. Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural*, 30(1), 8-21.
- Carvajal J., H. (25 de mayo de 2018). *Tesis Doctoral en Xarxa*. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10803/586047>
- Casas F., L. H. (2004). *Evaluación de sistemas constructivos. Metodología*. Santiago de Cali: Citce.
- Comisión Corográfica bajo la dirección de Agustín Codazzi (1957). *Geografía física y política de las provincias de la Nueva Granada*. Tomo I (vols. 1, 2, 3 y 4). Bogotá: Banco de la República.
- De San Nicolás, F. (1989). *Arte y uso de arquitectura*. Tomo I. Edición facsímil de la de Plácido Barco López de 1796. Zaragoza: Sección de Cultura de la Delegación de Zaragoza.
- Enet, M. (noviembre-diciembre, 1997). Un nuevo método de evaluación para seleccionar una tecnología “apropiada” en la producción masiva de vivienda. *Informes de la Construcción*, 49(452), 199-229.
- Gómez L., L. (2004). *Los pisos en las edificaciones religiosas de época colonial. Análisis de seis casos de estudio en el altiplano cundiboyacense* [tesis de maestría. Directora Monika Therrien]. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- González M.-N., J. y Casals B., A. (2002). *Gaudí y la razón constructiva*. Madrid: Akal.
- González, J.-L., Casals, A. y Falcones, A. (1997). *Claves del construir arquitectónico. Principios* (vol. 1). Barcelona: Gustavo Gili.
- Hernando de la C., R. y Huerta F., S. (1998). La teoría de bóvedas en el siglo XVIII. La contribución de Philippe de la Hire. *Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, pp. 233-244.
- Mark, R. (2002). *Tecnología arquitectónica hasta la Revolución científica. Arte y estructura de las grandes construcciones*. Madrid: Akal.
- Monjo, J. (noviembre, 1986). Propuesta de evaluación de sistemas constructivos. *Informes de la Construcción*, 38(385), 193-219.
- Rondelet, J. (1881). *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. París: Didot.

Capítulo 3

Coser el concreto. Técnica y tecnología del concreto reforzado con fibras vegetales

Juan Carlos Ochoa B.

Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia

INTRODUCCIÓN

El concreto convencional es el material de construcción más usado en nuestro medio. Se fabrica mezclando materiales inertes, agregado grueso, agregado fino y cemento Portland. El cemento reacciona químicamente con el agua para formar una masa moldeable, en sus primeras horas, que luego endurece hasta obtener altas resistencias mecánicas y durables.

A pesar de su alta resistencia a la compresión¹ es un material frágil². Esta fragilidad hace que los elementos de concreto colapsen súbitamente, sin dar tiempo a tomar medidas de seguridad que, en muchas ocasiones, salvan vidas. Para contrarrestarla se utiliza el concreto reforzado con barras de acero, sin embargo, el acero de refuerzo también tiene varias desventajas: la corrosión es la principal causa del deterioro de las estructuras, es muy costoso y su producción es responsable del 31 % de la emisión de CO₂ del concreto reforzado (Van Gorkum, 2010).

Los concretos con fibras hacen parte de la búsqueda constante por mitigar los efectos que la fragilidad del material produce en las estructuras de concreto. Las fibras cosen el elemento mejorando su ductilidad³ no, como muchas veces se piensa, para reemplazar el acero de refuerzo

¹ Es la resistencia que opone un sólido a dejarse comprimir. El concreto se reconoce como un material de alta resistencia a la compresión, por consiguiente, es su propiedad mecánica más relevante en el desempeño estructural.

² Un material frágil es aquel que no admite mayor deformación cuando es sometido a una carga. La rotura se produce de manera súbita.

³ Es la capacidad que tiene un sólido para sufrir una gran deformación permanente sin llegar a la rotura.

que le confiere al material mayor esfuerzo a la tracción⁴ y flexión⁵. El verbo *coser*, que he utilizado para titular el artículo, significa en una de sus acepciones, unir una cosa con otra, de suerte que queden muy juntas o pegadas. Para coser, término utilizado cotidianamente en la fabricación de prendas, se utiliza el hilo. Esta similitud la he utilizado para demostrar cómo las fibras en el concreto logran coser las partes de un elemento de concreto de tal forma que retrasan su colapso.

La primera consecuencia del incremento de la ductilidad del concreto *cosido*, es el aumento de la resistencia residual a flexo-tracción después de la primera fisura. Hay, entonces, un mejor comportamiento hasta tanto la deformación y el ancho de la fisura sea preocupante (Momoh y Osofero, 2019; Juárez *et al.*, 2010). Otras ventajas asociadas a la incorporación de fibras en el concreto son la reducción de la fisuración por retracción (Toledo *et al.*, 2005), la disminución de la conductividad térmica (Kammoun y Trabelsi, 2019), el mejoramiento del desempeño acústico al incrementar la absorción del sonido en un nivel específico de humedad y densidad (Neithalath, Weiss y Olek, 2004) y el incremento de la resistencia al fuego (Kim, Dutta y Bhattacharyya, 2008).

Son muchos los tipos y origen de las fibras que se usan para *coser* el concreto: acero, sintéticas, vidrio y algunas vegetales o celulósicas (FV). Fibras como las de acero y algunas de las sintéticas mejoran una o varias propiedades del concreto, aunque algunas a costos muy elevados. Estas fibras retienen o incrementan la resistencia del compuesto, son químicamente inertes o se les recubre para evitar corrosión, disminuyen la permeabilidad del concreto y controlan la fractura plástica, entre otros. Sin embargo, también tienen algunos problemas como la adecuada adherencia entre la fibra y la matriz. Las fibras de polipropileno y de poliéster tiene muy bajo módulo de elasticidad y otras, como las de carbón y de aramida, tienen un costo demasiado elevado. Las fibras de polipropileno son las más utilizadas dentro de las sintéticas; son inertes químicamente, hidrofóbicas, de baja densidad y muy reducido costo.

⁴ Es la máxima resistencia que opone un sólido a la tracción. La resistencia a la tracción de un elemento de concreto es muy baja, comparada con la compresión. Es por esto que se refuerza el concreto con acero.

⁵ Es el esfuerzo combinado de tracción y compresión en la sección de un elemento longitudinal

Durante los últimos años, los problemas medioambientales han motivado la investigación en materiales amigables con la naturaleza. Particularmente, se ha incrementado la investigación en fibras obtenidas de procesos agroindustriales para ser utilizadas en materiales compuestos. Las FV tienen grandes ventajas sobre otro tipo de fibras: la mayor disponibilidad, posibilidad de reciclaje, bajo costo, biodegradación, no dejan huella de carbono y tienen buenas propiedades físicas y mecánicas (baja densidad, rigidez, tenacidad y resistencia) (Ardanuy, Claramunt y Toledo, 2015).

Las FV se pueden encontrar en una gran variedad de formas (hilos, estopa o pulpa), diámetros, longitud y rugosidad de la superficie. Esta superficie puede sufrir deterioro en ambientes altamente alcalinos, disminuyendo su durabilidad. La delignificación de la fibra, proceso de obtención de la pulpa, contribuye a la estabilidad de la fibra en ambientes alcalinos (Savastano *et al.*, 2009).

Los problemas de durabilidad se asocian con la fragilidad y fácil fractura de la fibra debido a la mineralización del lumen, lo que se manifiesta en la reducción de la resistencia a la posfractura y la tenacidad. Es por eso que las FV pueden ser modificadas con el propósito de hacerlas más hidrofóbicas, hidrofílicas, para modificar sus grupos funcionales o mejorar sus condiciones durables (Ballesteros *et al.*, 2019; Saba *et al.*, 2016; Mohr, Nanko y Kurtis, 2005).

Si bien las fibras vegetales se han utilizado como refuerzo en materiales de construcción desde la época clásica, la tecnología para ser aplicada en el concreto, tal como la conocemos ahora, se empezó a desarrollar a partir de los años cuarenta del siglo XX. Responde a la necesidad de sustituir las fibras de asbesto que fueron consideradas con alto poder cancerígeno (Tonoli *et al.*, 2011).

Las aplicaciones de morteros y concretos reforzados con FV están orientadas hacia la fabricación de elementos no estructurales, muros divisorios, paneles para fachadas, cielos falsos, láminas delgadas, tejas y elementos prefabricados en general (Roma, Martello y Savastano, 2008; Claramunt *et al.*, 2016; Kochova *et al.*, 2020).

En este trabajo se resumen los resultados de las investigaciones realizadas en los últimos años (2000-2019) de los concretos reforzados con FV.

Se muestran los tipos de fibra y se comparan las propiedades físicas y mecánicas de los concretos.

TIPO Y ORIGEN DE LAS FIBRAS NATURALES

Las células de las plantas se distinguen de las células de los animales, en que las primeras están rodeadas por una pared celular rígida. En algunos tipos de células, las paredes celulares se amplían para tener mejores propiedades mecánicas.

La dimensión de las fibras varía según el tipo de planta, pero su promedio de longitud está entre 1 y 35 mm, y el diámetro entre 15 y 30 μm . A propósito de los concretos reforzados con FV, la longitud de las fibras se podría agrupar en:

- Fibras cortas (1 a 5 mm). Se originan en especies maderables y no maderables. Se usan para fabricar materiales compuestos con propiedades isotrópicas, es decir, compuestos que no requieren una orientación específica de la fibra.
- Fibras largas (5 a 50 mm). Se originan en plantas no maderables, especies como lino, yute o cáñamo. Se usan para fabricar materiales compuestos con propiedades anisotrópicas, es decir, compuestos que requieran una orientación específica de la fibra. Se presentan como:
 - › Hilos de semillas; fibras recolectadas de semillas o racimo de semillas, por ejemplo: algodón, kapok, fibra de coco y álamo.
 - › Fibras derivadas de la corteza de dicotiledóneas, que incluye plantas herbáceas, arbustos y árboles (madera dura, madera blanda y madera reciclada).
 - › Fibras foliares, derivadas de los haces vasculares de hojas muy largas de algunas monocotiledóneas. Las fibras de la hoja también se conocen como fibras “duras” porque están más lignificadas que las fibras del líber.
 - › Fibras de hierba, son otro grupo de fibras monocotiledóneas, en las que todo el tallo, junto con las hojas, son pulpadas y utilizadas en la fabricación de papel. Dichas pulpas están compuestas no solo de fibras, sino también de otros elementos celulares.

Algunas de las plantas que dan origen a las fibras que cosen el concreto se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Plantas más comunes de donde se extraen las FV para el concreto

Origen de la fibra	Planta
Tallo/bagazo	Bambú (<i>Bambusa vulgaris</i>)
	Caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)
	Yute (<i>Corchorus capsularis</i>)
	Banano (<i>Musa cavendishii</i>)
	Pasto elefante
	Kenaf (<i>Hibiscus cannabinus</i>)
	Eucalipto (<i>Eucalyptus grandis</i>)
	Espiga de arroz
	Cáñamo (<i>Cannabis</i>)
	Esparto (<i>Spartium junceum</i>)
Fruta/semilla	Palma de aceite (<i>Elaeis guineensis</i>)
	Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>)
	Palma datilera (<i>Phoenix dactylifera</i>)
Hoja	Piña (<i>Ananas comosus</i>)
	Lechuguilla (<i>Agave lechuguilla</i>)
	Sisal (<i>Agave sisalana</i>)
	Maguey (<i>Agave salmiana</i>)
	Aloe (<i>Aloe</i>)
	Cactus (<i>Opuntia ficus-indica</i>)
Fique (<i>Furcraea cabuya</i>)	

Fuente: elaboración propia.

En la figura 1 se observa la planta de fique o cabuya, bastante cultivada en Colombia, y de la cual se extraen fibras largas para el uso en empaques y artesanías. El remanente, la fibra corta, puede ser utilizado para coser el concreto.



Figura 1. Planta de fique o cabuya de un cultivo de Copacabana, Antioquia.
Fuente: archivo propio.

La extracción de las fibras vegetales, en el caso de plantas suculentas, como son los agaves o la cabuya, se hace a partir de la hoja o penca de la planta. Las operaciones que se llevan a cabo, para el desfibrado de la cabuya, son en su orden: corte, despuntado, transporte hasta la máquina desfibradora (figura 2a), desfibrado, lavado y peinado de la fibra (figura 2b, secado de la fibra, empaque en haces o manojos y conformación de pacas.



Figura 2. a) Desfibrado de la hoja de fique; b) Fibra lavada y peinada.
Fuente: archivo propio.

Las hojas están compuestas de licor y fibra. El licor es una sustancia espesa y espumosa, que representa entre el 60 y el 80% del total de la masa y ha sido evaluado como aditivo plastificante y aireante en algunas investigaciones (Jaramillo y Ochoa, 2009). El porcentaje restante se encuentra en la fibra, tanto corta como larga; la fibra larga se utiliza para la fabricación de empaques y artesanía; la corta no se utiliza para este propósito, pero podría ser usada como fibra en el concreto.

En la tabla 2 se pueden ver algunas de las características físicas de las FV y se comparan con las fibras de vidrio y de acero. Los resultados se obtuvieron de las investigaciones antes citadas. Se observan algunas diferencias que son de resaltar y relevantes para el desempeño mecánico de las fibras: en primer lugar, el porcentaje de absorción de las FV es considerablemente mayor que las de fibra de vidrio y las de acero; si bien las FV tienen una buena resistencia a la tracción, que supera la del concreto simple (entre 2 y 3 MPa) es mucho mayor la de las fibras no vegetales; lo mismo sucede con el módulo de elasticidad que es altamente superado por las fibras de vidrio y de acero. La incidencia de estas características, en el comportamiento mecánico del material o de un elemento, se verá más adelante.

EL EFECTO DE LAS FIBRAS EN EL MATERIAL Y EN LA ESTRUCTURA

Las fibras que *cosen* el concreto actúan en dos escalas: en una primera fase, ante la presencia de una carga, el elemento⁶ de concreto se microfisura⁷ en distintas direcciones, pero no afecta sus propiedades mecánicas y, por lo tanto, se considera un fenómeno inherente al *material*. En este caso, la fibra ayuda al retraso en el proceso y por ende a su durabilidad. Cuando las microfisuras se unen para crear macrofisuras⁸ activas⁹ y se modifican las condiciones mecánicas del elemento, se considera que se entra a la escala de *estructura*. En esta escala, la fibra aumenta la capacidad de carga

⁶ En este texto se denomina *elemento* a la parte constituyente de un sistema constructivo.

⁷ Microfisura: es una fisura cuya longitud se considera muy pequeña respecto al tamaño de elemento o de la estructura.

⁸ Macrofisura: es una fisura cuya longitud se considera grande respecto al tamaño del elemento o de la estructura.

⁹ Fisura activa: es una fisura cuyos bordes sufren un desplazamiento normal o tangencial.

del compuesto, mejora su comportamiento a la tracción y la ductilidad (Massicotte y Bischoff, 2000).

En la mayoría de los casos, la dimensión óptima de las fibras que se requiere para que actúe sobre la microfisuración y la fisuración activa serán diferentes. En el caso donde las fibras deben actuar en la microfisuración, se requieren grandes volúmenes con diámetros pequeños (mayor área específica). Sin embargo, deben tener longitudes pequeñas para lograr la buena trabajabilidad del material, lo cual está estrechamente relacionado con la relación longitud/diámetro de las fibras.

En el caso donde las fibras se requieren para actuar en la macrofisuración, deben ser lo suficientemente largas para estar debidamente ancladas en la matriz. Por las mismas razones de trabajabilidad, las fibras largas deben ser involucradas en menores volúmenes que las fibras cortas.

Estas apreciaciones son reglas generales y requiere que sean evaluadas:

- El requerimiento de un alto porcentaje de fibras cortas o un bajo porcentaje de fibras largas solo aplica cuando la trabajabilidad es importante para la puesta en obra del concreto, como es el caso del vertido bombeado o proyectado. Cuando la trabajabilidad no es un factor importante, un alto porcentaje de fibra larga y con poco diámetro puede ser adicionada para que actúen tanto en la escala del material como de la estructura.
- La longitud de las fibras también depende de las características mecánicas de la matriz. Si la matriz es muy compacta, y hay buena adherencia con la fibra, la fibra corta puede funcionar efectivamente para ambos, la micro y la macrofisuración.
- El último factor que tiene que ver con la selección de fibra corta o larga es el efecto de escala. Este problema se encuentra en el caso donde la fisura es localizada en la escala de la estructura. Aquí, por razones geométricas obvias, para un tipo dado de estructura y esfuerzo, la apertura de la fisura dependerá de las dimensiones del elemento. Como resultado, un tamaño particular de fibra puede ser efectivo para este elemento, pero no para una más grande. Esto explica por qué, en el caso de un elemento que es grande en comparación con el diámetro del agregado, las fibras deben ser dos o tres veces más largas que el diámetro de las partículas de los agregados.

Tabla 2. Propiedades de las fibras vegetales utilizadas para el refuerzo en el concreto

	Diámetro (mm)	Densidad aparente (g/cm ³)	Contenido de humedad natural (%)	Absorción de agua (%)	Resistencia Tracción (MPa)	Elongación (rotura) (%)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Ref.
Bambú	0,22	0,66			206,2-575	3,2	20,1-28,8	
Fique		0,723		60 (1)	324,2	6	8,2	
San	0,03 a 0,10		1,1 a 1,04	85 (1)	195 a 235	1,19 a 1,36		
Sisal	0,12-0,20	0,90-0,564	13,3	82,0 (1))	458-577,5-363	4,3-3,0-4,0	15,9 -19,00-15,2	
Palma					143	5,9	5,6	
Caña de azúcar					181	3,77	5,0	
Coco	0,25	0,80-0,638		22,00 (1)-155 (2) -180	108,26-180,0 -160,0	25,0-29,2-18,0	13,7-2,8-22,5	(Wang y Chouw, 2017)
Yute	0,15	1,03		214 (2)	300	1,7	2,9	
Lechuguilla				89,0 (1)				
Maguey				61,0 (1)				
Fibra de vidrio	0,09-0,015			0	1 380	3,77 (4,8)	55,6 (72,5)	
Acero	0,1-0,16			0	2 800	3-4 (2,0)	200 (197)	

Después de 5 minutos sumergidas en agua.

Después de 1 hora sumergidas en agua.

Fuente: elaboración propia.

LAS FIBRAS VEGETALES (FV) COMO REFUERZO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Las FV son producidas en muchos países del tercer mundo. La mayoría de ellas requiere un bajo grado de industrialización en su proceso y mejoramiento. Las primeras investigaciones publicadas de FV como componente de compuestos cementicios datan de mediados de los años setenta pero solo en 1986, el Rilem (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) convoca al “Primer Simposio Internacional en el uso de Plantas Vegetales y sus Fibras como Materiales de Construcción”, que se llevó a cabo en Bagdad, Irak (Rilem, s. f.).

El uso de fibras naturales actúa en los compuestos de cemento, tal cual lo hacen las fibras no vegetales, que buscan modificar ciertas propiedades físicas y mecánicas. Algunas de ellas son:

- Control de grietas de contracción plástica. Al reducirse traen como efecto mayor integridad, resistencia y longevidad a la estructura.
- Incremento de la resistencia a la flexión.
- Incremento de la tenacidad, la ductilidad y la resistencia a la fatiga.
- Incremento de la resistencia al impacto.
- Control de la ruptura de fisura mejorando la resistencia última a tracción.
- Prevención del astillamiento o fragmentación del concreto, de importancia especialmente en zonas de alto riesgo sísmico.

Algunos factores que influyen en las características del concreto reforzado con fibras vegetales, de acuerdo con Azis (1981), se muestran en la tabla 3:

Tabla 3. Factores de las FV que influyen en las características del concreto fibro-reforzado

Factores	Variables
Geometría de la fibra	Longitud, diámetro, sección transversal, conformación. Las fibras son generalmente más gruesas hacia la raíz de la planta y más delgada hacia su otro extremo
Forma de la fibra	Monofilamento, multifilamento
Superficie de la fibra	Rugosa, brillante, traslapado
Propiedades de la matriz	Tipo de cemento, tipo y granulometría de agregado, tipo de aditivo
Proporciones de la mezcla	Relación agua-cemento, consistencia, contenido de fibra
Método de mezclado	Tipo de mezcladora de hormigón, secuencia en la adición de la fibra, tiempo de mezclado
Método de moldeo	Método de vibrado convencional, aspersión, extrusión, proyección, presión
Método de curado	Convencional, especial

Fuente: elaboración propia.

La cantidad de fibra (medida en volumen - V_f) y su longitud (L_f), deben superar un valor crítico mínimo, por el contrario, causarían deterioro de las propiedades mecánicas. La longitud mínima de fibra, independiente de la carga aplicada, se denomina la longitud crítica de fibra, $(L_c)_{crit}$, y es la mínima longitud con la cual se puede lograr la transferencia de una carga última plena a la fibra. La longitud crítica también se llama “longitud ineficiente”.

La adhesión entre la fibra y la matriz se atribuye a cinco mecanismos, que pueden actuar por separado o combinadamente para producir la unión o el acople:

- La adsorción y humectancia que ocurre por atracción física entre dos superficies de carga neutra.
- Interdifusión, donde el enlace se forma por difusión molecular de una de las superficies en la otra.

- La atracción electrostática, cuando dos superficies de cargas eléctricas opuestas se atraen como en las interacciones ácido-base y del enlace iónico.
- Enlace químico, cuando este se forma entre dos grupos químicos que residen uno en la matriz y otro en la región fibrosa.
- Adhesión mecánica o física, donde la resistencia de la interface a la tensión es reducida, pero su resistencia a la cizalladura puede ser importante en la medida de la aspereza de la superficie.

APLICACIONES DEL CONCRETO REFORZADO CON FV

Es importante recordar que, con la adición de fibras en elementos de concreto, no se pretende, en primera instancia, mejorar las resistencias mecánicas; el propósito principal es controlar el agrietamiento. El comportamiento de la interface, compuesto-fibra, es esencial, puesto que de ello dependerá la capacidad del material para soportar cargas, aún después de haberse agrietado. Los esfuerzos a los que el material está sometido son transferidos de la matriz a las fibras a lo largo de la interface. Por ello, el mecanismo de contacto, en la unión entre la matriz y la fibra, juega el papel más importante en el material compuesto.

Las aplicaciones más conocidas del concreto con FV son:

- Paneles de fachada. Se utilizan, además de la fibra, adiciones minerales puzolánicas como el metacaolín y el humo de sílice (Claramunt *et al.*, 2016).
- Tejas para cubierta. Se utilizan macro fibras vegetales, pero también micro y nano fibras como pulpa de celulosa (Roma, Martello y Savastano, 2008; Da Costa, Santos y Savastano, 2018).
- Placas para cielo-falso. Se aprovecha la capacidad aislante, sus propiedades acústicas y térmicas (Kochova, 2020).
- Como refuerzo de hormigones y morteros para pavimentos de andenes y aceras, recubrimientos o sobrecapas de vías ya existentes, que se hayan agrietado; losas y otros elementos planos horizontales.

DISEÑO DE LA MEZCLA Y MÉTODO DE FABRICACIÓN

Los factores determinantes para lograr una buena mezcla del concreto fibro-reforzado son:

- Tamaño máximo del árido grueso: menor o igual a la mitad de la longitud de la fibra. Esto permite que la fibra rodee el árido.
- Alto contenido de finos.
- Poco agua y utilización de aditivos reductores de agua.

El volumen de fibra, V_f , y su longitud, L_f , no pueden ser muy elevados. El V_f puede estar entre 30 y 60 kg/m³ para evitar la formación de ovillos pasta de cemento (ballings), los cuales afectan las resistencias mecánicas y la integridad del material compuesto. Otros factores que se deben tener en cuenta son: la relación agua-cemento, el volumen de los agregados y el tamaño de la fibra. W. Wang y N. Chouw, utilizaron la siguiente dosificación del concreto, reforzado con fibra de coco: relación agua-cemento 0,52; relación cemento-agregado grueso 2; relación cemento-agregado fino 2; longitud de la fibra 25, 50 y 75 mm; volumen de fibra 0,6%. La masa de la fibra fue descontada de la del agregado. Con esta mezcla obtuvieron una fluidez entre 35 y 37 mm.

PREPARACIÓN Y PUESTA EN OBRA DE LA MEZCLA

Como criterio general, para lograr la trabajabilidad necesaria y evitar la formación de ovillos, los agregados se deben humedecer con agua, previamente, para que luego no absorban agua requerida para la hidratación del cemento. Minutos antes de la preparación se les debe determinar la humedad para corregir el contenido de agua a adicionar.

No existe un método generalizado para la preparación de la mezcla reforzada con FV , cada investigador ha ensayado el propio. Por consiguiente, esta variable debe ser considerada y estudiada por quien esté encargado de la ejecución de la mezcla. En la tabla 4 se mencionan algunos sistemas probados con éxito.

Tabla 4. Sistemas para la preparación de concretos reforzados con FV

Sistema	Orden	Procedimiento
Fique Mezcladora de tambor troncocónica Tiempo de mezclado 5 minutos incluyendo dos (2) para la introducción de las fibras.	Primer paso	Se vierte parte del agua de mezclado
	Segundo paso	Se agrega parte del agregado, alternando los gruesos con los finos siempre girando el trompo.
	Tercer paso	Se adiciona el cemento en forma alternada con el resto de los agregados.
	Cuarto paso	Se agrega el resto de agua de amasado con el superplastificante Sikament 320 (S-320).
	Quinto paso	Se desenredan y se ponen las fibras al azar y en forma manual hasta que se involucraran con la matriz.
Madera Mezcladora convencional.	Primer paso	Se adiciona el cemento, la arena y un 70% del agua. Se mezclan a baja velocidad (140 RPM) por cerca de 1 minuto hasta lograr una mezcla uniforme.
	Segundo paso	Se aumenta a media la velocidad de la mezcladora (285 RPM) y se adicionan gradualmente las fibras y el resto del agua con el super plastificante mezclando por un periodo de 2-5 minutos dependiendo del contenido de fibras.
	Tercer paso	Se adiciona el acelerante y se mezcla por un minuto a velocidad media.
	Cuarto paso	Se para la mezcladora y se espera por un (1) minuto.
	Quinto paso	Se finaliza el proceso mezclando a alta velocidad (450 RPM) por dos (2) minutos.
Hoja de palma Mezcladora de eje vertical	Primer paso	Se vierten los ingredientes secos y se mezclan por un (1) minuto.
	Segundo paso	Se adiciona el agua durante los dos (2) minutos siguientes.
	Tercer paso	Se agrega la fibra distribuyéndola en toda la superficie hasta que haya sido absorbida por la matriz.

Sistema	Orden	Procedimiento
Sisal y fibra de coco - Mortero Mezcladora de eje vertical	Primer paso	Se mezcla la arena con el 40% del agua.
	Segundo paso	Se adicionan el cemento y las fibras pequeñas, agregando lentamente un 35% del agua.
	Tercer paso	Después de tener la mezcla homogenizada se adiciona el agua restante y se deja en movimiento por 5 minutos.
Coco (Wang y Chouw, 2017)	Primer paso	Se ponen capas de agregado grueso, agregado fino, las fibras y el cemento, y se mezclan por 90 seg.
	Segundo paso	Se añade la mitad del agua y se mezcla por 2 min.
	Tercer paso	Se vierte el resto de agua y se mezcla por 90 seg.

Fuente: elaboración propia.

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS CONCRETOS REFORZADOS CON FV

La resistencia es el esfuerzo más grande que puede soportar un material que está sometido a cargas externas, bien sea estáticas o dinámicas. Según las cargas externas, la resistencia de un material incluye: resistencia a la tracción, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia al corte, resistencia al impacto, entre otras. La resistencia a la tracción, a la compresión y al corte puede calcularse como lo muestra la ecuación 1:

$$f = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 1}$$

En esta fórmula: f es la resistencia del material (MPa).

P es la máxima carga que resiste el material cuando se destruye (N).

A es el área de soporte de la fuerza del elemento (mm²).

Las estructuras de concreto pueden estar expuestas, durante su vida útil, a cargas por periodos de tiempo muy cortos o cargas dinámicas: sismos, impactos y explosiones. El concreto responde a estas cargas de forma diferente a cuando se trata de cargas estáticas. El concreto simple (cs), no reforzado, tiene alta resistencia a la compresión, pero muy pobre a la tracción (aproximadamente 1/10 parte de la resistencia a la compresión) y muy baja resistencia a la fisuración por flexión debido a su fragilidad. Es por esto que la capacidad de deformación del cs es inadecuada para absorber energía y resistir las cargas por impacto. La fragilidad del cs puede ser mitigada con la adición de fibras. Cuando se adicionan fibras al cs se incrementa la adherencia de la pasta de cemento y de la matriz del cs; como resultado se incrementan sus propiedades mecánicas (Al-Masoodi *et al.*, 2016).

La función primaria de las fibras en el concreto es reducir y controlar la velocidad de propagación de la fisuración, manteniendo el ancho de fisura al mínimo. Por lo tanto, la inclusión de fibras en el concreto reduce la fisuración por corte y flexión. Además, la adición de fibras mejora la ductilidad del concreto y, de este modo, mejora la capacidad de absorción de energía. El comportamiento a tracción y compresión del concreto reforzado con fibras (CRF) también es mejor que el del cs (Al-Masoodi *et al.*, 2016).

Resistencia a la compresión

La *resistencia a la compresión* es la capacidad que tiene un material para no dejarse comprimir. Ali *et al.* (2012) demostraron que la resistencia a la compresión de concreto reforzado con fibras de coco depende tanto de su volumen, como de la longitud de la fibra. La resistencia disminuye a medida que se incrementa la cantidad de fibra y la longitud. En comparación con el concreto sin fibra, la resistencia se incrementa más del 24%. Solo con fibras de 7,5 cm y con contenidos de 2% o 3% la resistencia es menor que la del cs, lo que se podría atribuir a una mayor formación de macroporos. La mayor resistencia se logró con una cantidad de 5% y 5 cm de longitud de fibra.

Wang y Chouw (2017) encontraron un comportamiento similar: a medida que se incrementa el volumen y la longitud de la fibra, se dismi-

nuye la resistencia a compresión. A diferencia de los anteriores autores, comparado el CFR con el CS, la resistencia se disminuye de forma leve, 6% aproximadamente. Sin embargo, el CF tiene un mejor desempeño en cuanto a resistencia al desconchado y la fragmentación, lo cual se debe a la función *cosido* que le aporta la fibra.

Resistencia a la tracción (tracción indirecta)

La *tracción indirecta* consiste en aplicar una carga a compresión diametral, a lo largo de un cilindro de concreto, hasta que se rompa. Esta carga induce esfuerzos de tracción en el plano donde se aplica la carga y esfuerzos de compresión, relativamente altos, en la zona inmediata alrededor de la carga aplicada. Se produce un fallo a tracción en vez de compresión porque las áreas de aplicación de la carga están en un estado de compresión triaxial, lo que les permite soportar mucho más altos esfuerzos de compresión que las del ensayo uniaxial a compresión. La tracción indirecta es generalmente más grande que la tracción directa y más baja que la resistencia a la flexión (módulo de rotura). El valor de la tracción indirecta se usa en el diseño de concretos estructurales livianos para evaluar la resistencia al corte y determinar la longitud de desarrollo del acero de refuerzo (American Society for Testing and Materials, 2017, p. 5).

La resistencia a la tracción indirecta decrece con el mayor volumen de fibras. Respecto a la longitud de la fibra, al comienzo se incrementa con la mayor longitud (5 mm) y luego decrece levemente. En investigaciones con fibra de coco, el menor valor se obtuvo con 5% de volumen y 2,5 cm de longitud de fibra; y el mayor valor, con 1% de volumen y 7,5 cm de longitud de fibra. Comparando CFR con el CS, la adición de fibra puede incrementar o disminuir la resistencia a la tracción indirecta más del 11% (Ali *et al.*, 2012).

Resistencia a la flexión

La *resistencia a la flexión* está relacionada con la fuerza que soporta un material y la forma de la sección transversal. De acuerdo con la norma ASTM C78/C78M-18, *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete*

(Using Simple Beam with Third-Point Loading) (American Society for Testing and Materials, 2018, p. 5) la resistencia a la flexión se reporta como el módulo de rotura (MOR por sus siglas en inglés). El MOR corresponde al cálculo de la resistencia, asumiendo un comportamiento elástico lineal, en la cara sometida a flexión de un elemento (viga) cuando alcanza la máxima deformación y la fractura.

Si la fractura se inicia en el tercio medio de la luz (distancia entre apoyos) de la probeta, el MOR se calcula en la forma de la ecuación 2;

$$R = \frac{Pl}{bd} \quad \text{Ecuación 2}$$

En esta fórmula: R es el módulo de rotura (MOR), MPa.
P es la máxima carga que resiste el material cuando se fractura (N).
l es la distancia entre los apoyos (mm).
b es el promedio del ancho de la sección transversal (mm) en la fractura.
d es el promedio de la altura (profundidad) de la sección transversal de la probeta (mm) en la fractura.

Si la fractura ocurre en la cara de la tracción pero por fuera del tercio medio de la luz (distancia entre apoyos) por no más de 5% de la luz, el MOR se calcula de acuerdo con la ecuación 3.

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

En esta fórmula: a es el promedio de la distancia entre la línea de fractura y la medida más cerca al apoyo en la cara de tracción de la viga.
P es la máxima carga que resiste el material cuando se destruye (N).
l es la distancia entre los apoyos (mm).
b es del ancho de la sección transversal (mm).
h es la altura de la sección transversal (mm).

Xie *et al.* (2015), encontraron que el MOR de placas fibro-reforzadas con espiga de arroz y bambú está en función del contenido de fibra en la matriz. La variación en la MOR de las placas reforzadas con fibras de espiga de arroz, a los 28 días de curado, es similar que a los 100 días de curado. Hasta con el 2% de fibra, el MOR muestra un fuerte decrecimiento que va disminuyendo a medida que se aumenta el contenido de fibra en la matriz. A partir del 8% vuelve a experimentar un decrecimiento constante a medida que se aumenta la fibra. La adición de 2% y 4% de fibra causa una disminución de 24,3% y 18,9% del MOR, comparados con la muestra no reforzada.

De acuerdo con el análisis de Khorami y Ganjian (2011, citado por Xie *et al.*, 2015) una pequeña cantidad de fibra no puede ser distribuida uniformemente en la matriz y algunas áreas de las probetas quedan sin fibras, lo cual podría inducir al crecimiento de fisuras en esas áreas. Cuando las fibras superan el 6%, se distribuyen en toda la matriz. El MOR se incrementa gradualmente a medida que se aumenta la cantidad de fibra, y la máxima resistencia a la flexión se logra con el 8% de contenido de fibra, por peso. El MOR de las probetas reforzadas con fibra de espiga de arroz es el 124,3% de la muestra control a los 28 días de curado. Más allá de la cantidad de fibras, el MOR decrece debido al llamado “efecto de bola” (aglomeración de las fibras en algunas partes del compuesto) (Chakraborty *et al.*, 2012, citado por Xie *et al.*, 2015). Las fibras actúan como un “puente” para la hidratación del cemento a edades tempranas, un incremento de fibras reduce la formación de productos de hidratación y la resistencia a la flexión.

Ali *et al.* (2012) compararon dos tipos de vigas: unas reforzadas con 5% de fibra de coco de longitud 5 cm y otras sin fibra. El MOR de las probetas incrementa con la mayor cantidad y longitud de fibra. No obstante, el MOR obtenido en el concreto reforzado con 5% de volumen y 5 cm de longitud (4,5 MPa aprox.) fue levemente mayor que en el concreto simple. Si bien las dos viguetas se fracturaron (figura 3), las vigas reforzadas con fibra permanecieron unidas (figura 3b), aún después de la carga máxima (efecto *cosido*).

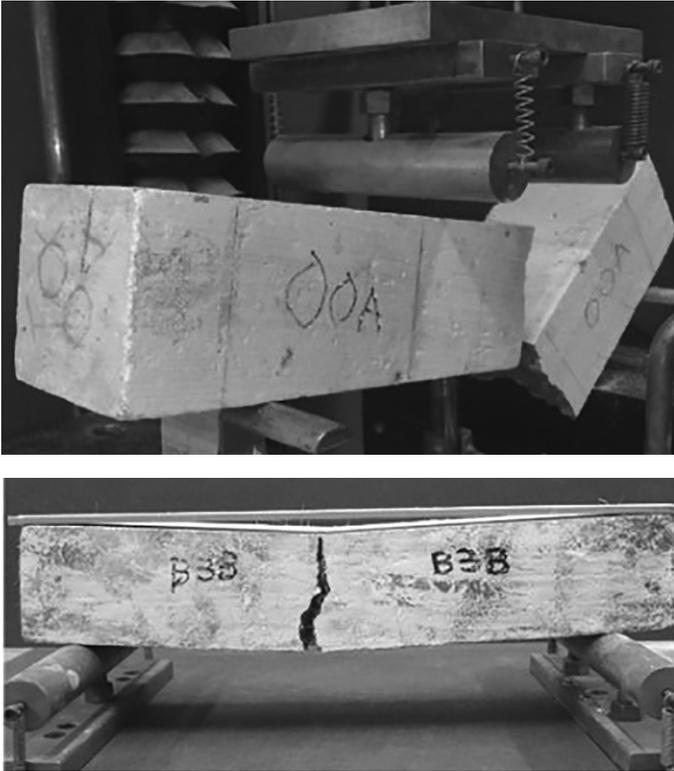


Figura 3. Rotura de las vigas: a) viga sin fibra de refuerzo;
b) viga con fibra de refuerzo.
Fuente: Ali *et al.*, 2012.

Para reforzar una matriz de concreto no solo se utiliza fibra corta, también se usa microfibras (longitud 0,8 mm, diámetro promedio 19,8 μm) obtenida de la pulpa de la planta. Además de la microfibras, la pulpa, contiene lignina, celulosa y hemicelulosa. Los datos conseguidos por Correia *et al.* (2014) utilizando pulpa de bambú, ratifican los resultados Xie, *et al.* Con un contenido de hasta 8% por masa de concreto, consiguió el mayor MOR ($7,5 \pm 0,1$ MPa). A medida que incrementaba el contenido de pulpa, este disminuyó hasta alcanzar, con el 12%, un MOR de $5,8 \pm 1,51$ MPa. El comportamiento mecánico de la matriz reforzada con el 10% y 12% de pulpa fue más bajo debido a la excesiva porosidad aportada por la fibra, mientras que la tenacidad, después de la primera fisura, aumentó. La cantidad óptima de fibra en la matriz

debe ser considerada de acuerdo con la aplicación que se la vaya a dar al material compuesto. Por ejemplo, si el material requiere mayor esfuerzo o mayor resistencia al impacto.

El envejecimiento de la matriz también tuvo su efecto en el MOR. Para un mismo porcentaje de fibra, 8%, la resistencia se aumentó a medida que se incrementó el número de ciclos de envejecimiento: 50 ciclos, $8,1 \pm 0,4$ MPa; 100 ciclos $8,2 \pm 0,8$ MPa; 200 ciclos $8,3 \pm 0,7$ MPa, comparado con $7,5 \pm 0,1$ MPa que obtuvo con 8 días de curado.

Fragilidad y tenacidad

La *fragilidad* se refiere a la propiedad de un material que se fractura ante un esfuerzo, pero se deforma levemente antes de la ruptura. Un material frágil se caracteriza por su baja deformación, poca capacidad para resistir impactos o cargas de vibración, alta resistencia a compresión, y baja resistencia a la tracción. La mayoría de los materiales inorgánicos no-metálicos son frágiles (Zhang, 2011a).

La *tenacidad* de un material es la capacidad que tiene de absorber energía y deformarse ampliamente sin fracturarse. Los materiales tenaces se caracterizan, además, por su alta resistencia a la tracción y a la compresión, como es el caso del acero, la madera y el caucho. Los materiales tenaces se deben usar en estructuras sometidas a cargas de impacto y vibración de rodamiento, como son las carreteras, puentes y pórticos de grúas (Zhang, 2011b). La *tenacidad* se calcula como el área bajo la curva de resistencia-deformación.

La resistencia al impacto del concreto es importante, en primera instancia, para evaluar la posibilidad de utilizar algunos sistemas de fundaciones, como es el caso de los pilotes hincados, o el uso de equipos de gran tamaño que podrían golpear accidentalmente los elementos estructurales, como en el caso del izaje de vigas prefabricadas para puentes. La resistencia al impacto del concreto es su capacidad de resistir repetidamente golpes, sin destruirse, y de absorber energía.

La resistencia a compresión del concreto sometido a una carga por impacto es diferente a cuando es expuesto a una carga estática. El Factor de Incremento Dinámico (DIF, por sus siglas en inglés) es el parámetro

que se usa para cuantificar el cambio en la resistencia a compresión bajo carga de impacto. El DIF es definido como la relación entre la resistencia a compresión bajo carga de impacto y el correspondiente bajo carga estática.

El concreto reforzado con fibras de bambú (FB) demostró tener mayor resistencia a la fractura y mejor absorción de energía. La tenacidad¹⁰ del concreto reforzado con 4% a 16% por peso de fibra, es entre 2,7 y 45,9 veces mayor que la del cs. La absorción de energía es entre 2 y 24 veces mayor. Sin embargo, debido a la aglomeración de fibras, cuando se adiciona un porcentaje mayor, la resistencia a la flexión, y al impacto, no se incrementa. La energía de impacto determina los diferentes patrones de falla y de absorción de energía: la baja energía de impacto produce desunión entre la fibra y la matriz. La alta energía produce delaminación y rotura (Xie, Zhou y Yan, 2019).

Ramakrishna y Sundararajan (2005) investigaron la resistencia al impacto de placas de mortero (dosificación 1:3, tamaño 300 mm x 300 mm x 20 mm) reforzado con fibras de coco, sisal, yute y cáñamo. Adicionaron, en porcentaje por peso de cemento, 0,5% - 1,0%, - 1,5% y 2,5% de fibras y tres longitudes 20 mm, 30 mm and 40 mm. Los resultados mostraron que la adición de estas fibras incrementó la resistencia al impacto entre 3-18 veces más que el espécimen de referencia. De las cuatro fibras, las placas con fibra de coco mostraron el mejor desempeño.

Wang y Chouw (2017) realizaron ensayos en cilindros de concreto reforzado con fibras de 25, 50 y 75 mm de longitud. En primer lugar, encontraron que la longitud de las fibras tiene muy poca influencia en el DIF. El daño en las probetas de concreto, debido a la carga de impacto repetida, se inicia con pequeñas grietas, cerca de la zona de impacto. Las grietas se empiezan a aumentar a medida que se aumenta la altura de la carga de impacto. La fractura final es una grieta diagonal y profunda a lo largo de la muestra. La longitud de la fibra influye en el comportamiento del concreto reforzado bajo carga de impacto repetida. Las fibras de 25 mm y 50 tienen mejor resistencia comparadas con las de 75 mm.

¹⁰ Resistencia de un material al impacto súbito o a los golpes.

La tenacidad del concreto reforzado con fibra de coco se aumenta a medida que se incrementa la cantidad de fibra. Con 5% de fibra y 5 cm de longitud se consigue la mayor tenacidad, 0,265 MPa (Ali *et al.*, 2012).

COMENTARIOS FINALES

Es indudable que las fibras vegetales cumplen su función de *coser* la matriz del concreto. Su efectividad en el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas dependerá de la longitud y de la cantidad de fibra que se adicionen a la mezcla.

El efecto de la fibra es preponderante en la resistencia a flexión, y la resistencia residual después de la primera factura. Al aumentar el área debajo de la curva carga-deformación, también se aumenta la *tenacidad*. Como efecto de esto se mejora, también, la resistencia al impacto.

La buena resistencia a la flexión de las fibras vegetales hace que el mecanismo predominante de falla del concreto sea por desprendimiento o arrancamiento de la fibra a la matriz cementante, y no por rompimiento o fractura.

No obstante su buen comportamiento mecánico, las fibras vegetales en un medio alcalino, como es el cemento, disminuyen su durabilidad. Para mitigar el deterioro que puedan sufrir se utilizan diferentes medios, la mayoría químicos, que buscan recubrir la fibra de tal manera que sea inmune al ataque alcalino. Sin embargo, y por las referencias encontradas, aún falta por investigar más sobre este tema y podría ser una línea factible de experimentación para futuros trabajos.

Un beneficio adicional, y no menos importante que el mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto, es que su uso podría contribuir a mitigar los problemas medioambientales generados por los residuos resultantes de los procesos agroindustriales; igualmente, le daría valor agregado a la siembra y cosecha de las plantas.

REFERENCIAS

- Ali, M.; Liu, A.; Sou, H. y Chouw, N. (2012, mayo). Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 814-825.
- Al-Masoodi, A. H. H.; Kawan, A.; Kasmuri, M.; Hamid, R. y Khan, M. N. N. (2016, febrero). Static and dynamic properties of concrete with different types and shapes of fibrous reinforcement. *Construction and Building Materials*, 104, 247-262.
- Almeida, A. E. F. S.; Tonoli, G. H. D.; Santos, S. F. y Savastano Jr., H. (2013, septiembre). Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. *Cement and Concrete Composites*, 42, 49-58.
- American Society for Testing and Materials (2017). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. En ASTM C496/C496-17.
- American Society for Testing and Materials (2018). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). En ASTM C78/C78M-18.
- Ardanuy, M.; Claramunt, J. y Toledo Filho, R. D. (2015, marzo 15). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*, 79, 115-128.
- Armol, G. M. y Savastano, H. (2017). Study of the degradation of non-conventional MgO-SiO₂ cement reinforced with lignocellulosic fibers. *Cement and Concrete Composites*, 80, 258-267.
- Azis, M. A. (1981). Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3(2), pp. 123-152.
- Ballesteros, J. E. M.; Mármol, G.; Filomeno, R.; Rodier, L.; Savastano, H. y Fiorelli, J. (2019, abril). Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance. *Construction and Building Materials*, 205, 52-60.
- Ballesteros, J. E. M.; Santos, S. F.; Mármol, G.; Savastano, H. y Fiorelli, J. (2015, diciembre). Evaluation of cellulosic pulps treated by hornification as reinforcement of cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 100, 83-90.
- Bilba, K. y Arsene, M.-A. (2008, septiembre). Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(9), 1488-1495.

- Chakraborty, S.; Kundu, S. P.; Roy, A.; Kumar Basak, R.; Adhikari, B. y Majumder, S. B. (2012). Improvement of the mechanical properties of jute fibre reinforced cement mortar: A statistical approach. *Construction and Building Materials*, 38, 776-784
- Claramunt, J.; Ardanuy, M.; García-Hortal, J. A. y Filho, R. D. T. (2011, mayo). The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 586-595.
- Claramunt, J.; Fernández-Carrasco, L. J.; Ventura, H. y Ardanuy, M. (2016, julio). Natural fiber nonwoven reinforced cement composites as sustainable materials for building envelopes. *Construction and Building Materials*, 115, 230-239.
- Correia, V. D. C.; Santos, S. F.; Mármol, G.; Curvelo, A. A. D. S. y Savastano, H. (2014, diciembre). Potential of bamboo organosolv pulp as a reinforcing element in fiber-cement materials. *Construction and Building Materials*, 72, 65-71.
- Da Costa Correia, V.; Santos, S. F. y Savastano, H. (2018). Vegetable fiber as reinforcing elements for cement based composite in housing applications - A Brazilian experience. En *Matec Web of Conferences*, 149.
- Delvasto, S.; Toro, E. F.; Perdomo, F. y De Gutiérrez, R. M. (2010, febrero). An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. *Construction and Building Materials*, 24(2), 187-192.
- Dos Santos, V.; Tonoli, G. H. D.; Mármol, G. y H. Savastano (2019, octubre). Fiber-cement composites hydrated with carbonated water: Effect on physical-mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, 124, 105812.
- Ghaffar, S. H.; Al-Kheetan, M.; Ewens, P.; Wang, T. y Zhuang, J. (2020, abril). Investigation of the interfacial bonding between flax/wool twine and various cementitious matrices in mortar composites. *Construction and Building Materials*, 239, 117833.
- Jaramillo Zapata, L. y Ochoa Botero, J. C. (2009). Evaluación del jugo de fique como aditivo oclisor de aire y su influencia en la durabilidad y resistencia del concreto (tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín). Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/70190>
- Juárez, C.; Guevara, B.; Valdez, P. y Durán-Herrera, A. (2010). Mechanical properties of natural fibers reinforced sustainable masonry. *Construction and Building Materials*, 24(8), 1536-1541.
- Kammoun, Z. y Trabelsi, A. (2019, junio). Development of lightweight concrete using prickly pear fibres. *Construction and Building Materials*, 210, 269-277.

- Khorami, M. y Ganjian, E. (2011, septiembre). Comparing flexural behaviour of fibre-cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus. *Construction and Building Materials*, 25(9), 3661-3667.
- Kim, N. K.; Dutta, S. y Bhattacharyya, D. (2018, julio 07). A review of flammability of natural fibre reinforced polymeric composites. *Composites Science and Technology*, 162, 64-78.
- Kochova, K.; Gauvin, F.; Schollbach, K. y Brouwers, H. J. H. (2020, enero). Using alternative waste coir fibres as a reinforcement in cement-fibre composites. *Construction and Building Materials*, 231, 117121.
- Lima, P. R. L.; Barros, J. A. O.; Roque, A. B.; Fontes, M. A. y Lima, J. M. F. (2018). Short sisal fiber reinforced recycled concrete block for one-way precast concrete slabs. *Construction and Building Materials*, (187), 620-634.
- Mármol, G. y Savastano, H. (2017, julio). Study of the degradation of non-conventional MgO-SiO₂ cement reinforced with lignocellulosic fibers. *Cement and Concrete Composites*, 80, 258-267.
- Massicotte, P. H. y Bischoff, B. (2000). Fibre reinforced concrete: a structural perspective. En P. Rossi y G. Chanvillard (eds.), *Fifth International Rilem Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC)* (pp. 193-202). Lyon: Rilem
- Momoh, E. O. y Osofero, A. I. (2019, octubre). Behaviour of oil palm broom fibres (OPBF) reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 221, 745-761.
- Mohr, B. J. J.; Biernacki, J. J. J. y Kurtis, K. E. E. (2007, noviembre). Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites. *Cement and Concrete Research*, 37(11), 1531-1543.
- Mohr, B. J.; Nanko, H. y Kurtis, K. E. (2005, abril). Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. *Cement and Concrete Composites*, 27(4), 435-448.
- Neithalath, N.; Weiss, J. y Olek, J. (2004, mayo). Acoustic performance and damping behavior of cellulose-cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 359-370.
- Ramakrishna, G. y Sundararajan, T. (2005). Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: A comparative study. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 547-553.
- Rilem - Introduction. (s.f.). Consultado el 14 de enero de 2020. Recuperado de <https://www.rilem.net/page/600082/introduction>.
- Roma, L. C.; Martello, L. S. y Savastano, H. (2008, abril). Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. *Construction and Building Materials*, 22(4), 668-674.

- Saba, N.; Jawaid, M.; Alothman, O. Y. y Paridah, M. T. (2016, marzo 01). A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Construction and Building Materials*, 106, 149-159.
- Savastano, H.; Santos, S. F. F.; Radonjic, M. y Soboyejo, W. O. O. (2009, abril). Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 31(4), 232-243.
- Tolêdo Filho, R. D.; Ghavami, K.; England, G. L. y Scrivener, K. (2003, febrero). Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 185-196.
- Toledo Filho, R. D.; Ghavami, K.; Sanjuán, M. A. y England, G. L. (2005, mayo). Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 537-546.
- Tonoli, G. H. D. *et al.* (2013, marzo). Processing and dimensional changes of cement based composites reinforced with surface-treated cellulose fibres. *Cement and Concrete Composites*, 37(1), 68-75.
- Tonoli, G. H. D.; Rodrigues Filho, U. P.; Savastano, H.; Bras, J.; Belgacem, M. N. y Rocco Lahr, F. A. (2009, diciembre). Cellulose modified fibres in cement based composites. *Composites Part A-applied Science and Manufacturing*, 40(12), 2046-2053.
- Tonoli, G. H. D.; Santos, S. F.; Savastano Jr., H.; Delvasto, S.; Mejía de Gutiérrez, R. y López de Murphy, M. del M. (2011, febrero). Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 225-232.
- Van de Weyenberg, I.; Ivens, J.; De Coster, A.; Kino, B.; Baetens, E. y Verpoest, I. (2003). Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites. *Composites Science and Technology*, 63(9), 1241-1246.
- Van Gorkum, C. (2010). CO₂ emissions and energy consumption during the construction of concrete structures: Comparison between prefab and insitu concrete viaducts.
- Wang, W. y Chouw, N. (2017, marzo). The behaviour of coconut fibre reinforced concrete (CFRC) under impact loading. *Construction and Building Materials*, 134, 452-461.
- Xie, X.; Zhou, Z.; Jiang, M.; Xu, X.; Wang, Z. y Hui, D. (2015, agosto). Cellulosic fibers from rice straw and bamboo used as reinforcement of cement-based composites for remarkably improving mechanical properties. *Composites Part B-Engineering*, 78, 153-161.

- Xie, X.; Zhou, Z. y Yan, Y. (2019, septiembre). Flexural properties and impact behaviour analysis of bamboo cellulosic fibers filled cement based composites. *Construction and Building Materials*, 220(220), 403-414.
- Zhang, H. (2011a). *Building Materials in Civil Engineering* (traducción de Shuo Ma, Yanyan Wu). Oxford: Woodhead Publishing.
- Zhang, H. (2011b). *Building Materials in Civil Engineering* (1.^a ed.). Oxford: Woodhead Publishing.

Capítulo 4

La construcción sostenible —reflexiva—: un camino posible

Carlos Mauricio Bedoya Montoya

Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia

Edgar Adolfo Cano Restrepo

Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia

INTRODUCCIÓN: EL TERRITORIO Y LOS FLUJOS DE ENERGÍA Y AGUA

Si bien la extensión rural de Medellín es ampliamente superior a la construida, o mejor, a la que ya se encuentra conurbada, el área gris que se divisa desde la imagen satelital es lo suficientemente importante como para ejercer una presión dramática sobre los recursos de todo el territorio. Por ejemplo, según uno de los estudios realizados por el profesor Luis Carlos Agudelo, de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, solo para satisfacer las necesidades de alimentos de una ciudad con cerca de dos millones y medio de habitantes, es necesaria toda el área del departamento de Antioquia para ser dedicada al cultivo (Agudelo, 2010). Esto es lo que se conoce como *huella ecológica*.

Con los materiales de construcción sucede algo parecido, en tanto que se importan las materias primas de zonas vecinas, aunque con una mayor justicia, pues a diferencia de otras zonas urbanizadas del mundo, en Medellín y su área metropolitana las canteras para surtir a las factorías de concreto premezclado y a las constructoras están ubicadas en su interior. La energía eléctrica se genera en territorios distantes a la cabecera municipal; modelo aplicado en todo el país y que obedece a una concentración de centrales hidroeléctricas de gran tamaño desde las cuales se produce electricidad y se transporta luego por medio de cables y torres que parecen árboles de acero amarrados entre sí para no perderse en el camino.

Sin embargo, aunque Medellín y en general el Valle de Aburrá presenta un promedio generoso de precipitaciones (Ideam, 2019), y cuenta con un

río que llega hasta Puerto Berrío para luego descender entre meandros gigantescos hasta el mar Caribe, sucumbiendo a la salinidad de este, pero no sin antes pintarlo de café con su permanente sedimentación, y hay cuencas de quebradas por todas sus faldas, en cuanto al servicio de agua potable es muy vulnerable, pues cerca del 80% de lo que se consume en esta región metropolitana se importa de zonas ajenas a su jurisdicción político-administrativa, y también geográfica. Esto quiere decir que nuestro modelo de consumo de agua potabilizada y vertimiento de aguas residuales no ha cambiado en más de dos mil años con respecto a los acueductos romanos, pues se trae el recurso desde muy lejos; se trata, se consume, y luego, también hasta muy lejos, se envía lo que ya no es útil y limpio.

Gran parte del agua consumida en Medellín y sus municipios vecinos se importa desde el oriente cercano, donde se ubica el embalse de La Fe, en inmediaciones de El Retiro, y es sabido por muchos que en esa zona, conocida como Valle de San Nicolás, se está dando un impresionante crecimiento urbanístico, con proyecciones que según los expertos en asuntos de gestión inmobiliaria y crecimiento demográfico sitúan la población de esta futura conurbación en un millón de habitantes para 2030. Esto a su vez hace pensar que la demanda de agua potabilizada en esta zona urbanizada será importante, y que tal vez se genere una tensión geopolítica a escala regional en caso de no prever dos situaciones: el abastecimiento de agua potabilizada en el Valle de Aburrá de manera autosuficiente, o por lo menos más moderada en cuanto a la importación de otras zonas; y la implementación de un modelo de gestión sostenible del agua en el Valle de San Nicolás que, al margen de la tensión que pueda generarse con sus vecinos metropolitanos, evite precisamente tensiones hídricas en su territorio, desatadas por un consumo poco racional de este líquido.

En tal sentido vale la pena decir que en una edificación residencial, comercial o institucional, cerca del 50% del agua se emplea en usos no potables, o sea, actividades como vaciar sanitarios, trapear, lavar ropa, entre otras. Por lo tanto, ¿es necesario emplear agua potabilizada para tanta actividad en nuestras edificaciones, cuando tanto en el Valle de

Aburrá como en el de San Nicolás el promedio de lluvias anuales es generoso? La pregunta en sí misma nos da la respuesta, máxime cuando ya se cuenta con diseños hidrosanitarios que contemplan el uso de aguas lluvia, de acuerdo con la Ley 373 de 1997 y las normas técnicas colombianas emitidas por el Icontec para tales fines; como también con tecnologías de bajo costo que minimizan el consumo de agua en las edificaciones.

Pero más allá de ver este aspecto del agua como un asunto de sostenibilidad y tecnología, debe analizarse también como un asunto de geopolítica regional que no da espera, pues es posible que los habitantes del Valle de San Nicolás, una vez este comience a verse conurbado, no miren con agrado que el agua que se “produce” en su territorio sea almacenada ante sus ojos y conducida hacia otra conurbación para los mismos usos. Por lo tanto, el modelo de gestión del agua en nuestros territorios merece pensarse de manera sistémica y semicircular, que no por compartimientos y lineal, aunque este último haya sido desarrollado como muestra contundente de ese artificio que tanto incita a la velocidad y a la pérdida del ocio: el progreso.

LA MATERIALIDAD

Si algo define a la construcción como actividad es la materialización del proyecto: es por medio de este acto que la especie humana marcó enorme diferencia con respecto a las demás. Ayudada por ese gesto cultural que es la técnica alcanzó la elaboración de herramientas como prótesis o extensiones de su cuerpo, a esto se suma el control del fuego y la confección de materiales con características diferentes a las materias primas que inicialmente le proporcionaba la corteza terrestre.

Semejante logro hizo que nuestra especie tuviera la capacidad de transformación de los recursos y de las condiciones iniciales de los hábitats, esto, dada la capacidad de procurarse cobijo y confort mediante la delimitación de espacios por medio de la actividad constructora: una casa, un barrio, una villa, una ciudad. ¿Habrá algo de malo en este aspecto? Tal vez no, si se le mira desde un punto de vista evolutivo, pero

como la construcción y el desarrollo industrial no están desconectados del contexto, merece la pena un análisis más complejo, desde una visión sistémica. Y es en este aspecto, en el de la complejidad, que tiene sentido hacernos la pregunta de *hacia dónde va la construcción*, o incluso atreverse a formularla de un modo más comprometedor: *hacia dónde debería ir la construcción*.

Para construir aquello diseñado por la arquitectura y calculado por la ingeniería se necesitan materiales como la tierra, las rocas, el cemento, el vidrio, el acero, la madera, la guadua, el agua, la energía para ciertos procesos, entre muchos otros. Entre los citados, en la actualidad mundial, las rocas, el cemento y el agua tienen una participación relevante, si se considera que el concreto es el segundo material más consumido por la humanidad después del agua (Sakai, 2009). Y si a esto se agrega la participación del acero, el vidrio y los materiales cerámicos, se obtiene una situación ambientalmente crítica, pues estos materiales tienen en común actividades como extracción de materias primas mediante minería a cielo abierto en la mayoría de los casos, altos consumos de agua y una dramática demanda de energía que es proporcionada vía combustibles fósiles o presas.

Para entender que la concepción del ambiente construido se haya tornado en crítica para el equilibrio de los hábitats se hace necesario conectar dos hechos: el modelo lineal de extracción de recursos y el crecimiento acelerado de la población. El primero hace referencia a un modelo de producción basado en la minería a cielo abierto en el caso de las arenas, las gravas y las arcillas para la confección de morteros, concretos y ladrillos; luego de esta etapa viene la confección de los materiales compuestos y los elementos necesarios para dar forma a la edificación u obra civil; durante la construcción se generan residuos, vertimientos y emisiones que generalmente (en el caso de los dos primeros) son dispuestos en escombreras, rellenos sanitarios o vertidos a afluentes. En este flujo lineal no hay lugar para la renovación de los recursos, que son finitos, y se genera un pasivo ambiental creciente por la disposición de residuos de construcción y demolición conocidos como RCD. El segundo hecho obedece a un crecimiento acelerado o desmedido de la población

humana en el planeta, sobre todo en el siglo xx, que comenzó con menos de dos mil millones de habitantes y cerró con cerca de siete mil millones.

Al crecer la población mundial y tener como paradigma un flujo lineal de producción se aumentó el impacto ambiental por la minería de agregados, cerámicos, cemento, hierro para producir acero, vidrio; como también el consumo de agua y la demanda de energía. Además se incrementaron los impactos al ambiente por la generación de residuos ordinarios y de RCD que ocupan vasta áreas y volúmenes de territorio que se vuelven improductivos, o, que se desvalorizan paisajísticamente.

LA VIDA ÚTIL DE LA EDIFICACIÓN Y SU IMPACTO

Este es otro aspecto al que debe prestarse un interés particular, pues si bien al momento de construir el proyecto hay una inversión intensa de materiales y energía, es durante la ocupación de la edificación que se presenta el mayor impacto sobre el ambiente, debido al consumo de agua, energía (eléctrica y gas) y a que se generan residuos ordinarios y vertimientos durante un periodo mínimo de cincuenta años. Así que la concepción del proyecto debe partir de premisas sostenibles tanto para la ejecución como para la ocupación del proyecto.

Retornar a principios básicos como la iluminación y ventilación directa de espacios, además de ahorrar consumos innecesarios y costosos de energía, propicia ambientes más saludables debidos a la renovación permanente de aire que se genera. Debiera mirarse de manera especial la necesidad de “recuperar” este aspecto para los baños en cualquier tipo de edificio.

Y es que si bien la eficiencia de las luminarias y los electrodomésticos ha mejorado, cada vez somos más habitantes con un número creciente de equipos que requieren conexión a fuentes de energía eléctrica (computadores, celulares, cafeteras, bicicletas e incluso vehículos). Por lo tanto, aliviar la presión ejercida por el consumo y la demanda de energía es necesario y posible, y permitiría que, mediante el diseño arquitectónico, las áreas ganen la mayor luminancia solar posible durante las horas del día: luz difusa en climas templados y calientes, y radiación

directa en climas frescos y fríos (Bittencourt, 2015). La energía solar por medio de paneles térmicos (calentamiento de agua) y fotovoltaicos (electrodomésticos) contribuye significativamente a minimizar la dependencia sobre fuentes energéticas más costosas y de mayor impacto sobre los territorios.

Por otra parte, emplear sistemas de captación para el aprovechamiento de aguas lluvia no solo es posible si no que debiera ser un imperativo para viabilizar un proyecto edilicio, siempre y cuando las condiciones del lugar lo proporcionen. Ya se ha demostrado que es posible técnica y económicamente diseñar y construir redes hidrosanitarias que capten, almacenen y circulen el agua lluvia por las edificaciones para la descarga de aparatos sanitarios, aseo de zonas comunes, lavado de ropas y riego de jardines (Cano, 2014). Incluso se puede potabilizar para el consumo humano, empleando equipos de costo asequible que han sido históricamente usados en otros aspectos como limpieza y filtrado de piscinas y tanques.

HACIA DÓNDE DEBERÍA IR LA CONSTRUCCIÓN

Es posible generar un ejercicio constructor más reflexivo, que no pretenda dominar la naturaleza sino entenderla, haciéndola partícipe de sus estrategias. Para ello se cuenta ahora con múltiples opciones que ya no deberían seguir llamándose “alternativas”; al contrario, debieran ser una primera opción al momento de viabilizar un proyecto edilicio o de infraestructura. Por ejemplo, consolidar los sistemas constructivos basados en el aprovechamiento o valorización del suelo residual; confeccionar y utilizar ecomateriales obtenidos a partir del reciclaje de escombros pétreos como los residuos de concreto, ladrillo y morteros; diseñar estructuras en guadua y madera que, además de su riqueza estética, cuentan con suficiente estudio ingenieril y están avaladas por las normas técnicas colombianas y de sismo resistencia (Echavarría, 2017); donde sea posible, usar las aguas lluvia, haciendo su captación tanto en cubiertas como en fachadas y empleándola para usos que no requieran de potabilización; climatizar naturalmente o asistir mecánicamente lo menos posible el confort de los espacios; valorar la importancia del

paisajismo y del urbanismo bioclimático como generadores de espacios públicos que se convierten en significativos para la recreación o desenvolvimiento de la comunidad (Salazar, 2006).

A continuación, se muestran imágenes de las estrategias citadas en el párrafo anterior, que obedecen a proyectos diseñados, construidos y habitados bajo parámetros de construcción sostenible y economía semi-circular (Bedoya, 2018).



Figura 1. Vivienda Nasua. Rionegro, Antioquia. Mampostería en bloques de suelo cemento BSC; energía solar y reúso de aguas lluvia. Fuente: Bedoya, 2017.

El proyecto de vivienda Nasua contempla diseño arquitectónico bioclimático. Ubicado a 2 200 m s.n.m., sus estrategias procuran que el sol incursione en los espacios y proporcione calor a los materiales de la estructura y del piso, para que durante la noche el calor se transmita de los materiales al aire de los espacios, evitando así climatización (calefacción) mecánica.

El 100% de los muros fue construido con bloques de suelo cemento, empleando para la confección de estos mampuestos el suelo residual del lugar.

El calentamiento de agua, la iluminación y el funcionamiento de electrodomésticos se lleva a cabo en un 100% con energía solar térmica y

fotovoltaica. Otro aspecto para resaltar en Nasua es la utilización de aguas lluvia no solo para el funcionamiento de los aparatos sanitarios y actividades de aseo y lavado de ropas, sino también para el consumo humano mediante un pequeño filtro de potabilización.



Figura 2. Bloque 19A, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Mampostería en concreto con agregados reciclados. Fuente: Bedoya, 2018.

El bloque 19 del campus El Volador de la sede Medellín de la Universidad Nacional de Colombia fue construido en la década de los noventa, y se convirtió en un edificio pionero a nivel nacional en la implementación del concreto reciclado mediante bloques de mampostería tipo catalán, que fueron confeccionados con agregados obtenidos de la valorización de escombros. Estos bloques de concreto reciclado, además de representar un aporte a la disminución del impacto ambiental generado por la extracción de materias primas y la disposición de escombros, cumplen con un desempeño estético, físico-mecánico y de durabilidad al mismo nivel normativo que los bloques de concreto convencional confeccionado con agregados naturales.



Figura 3. Terra Biohotel, Medellín, Colombia. Edificio construido con bloques de concreto reciclado, iluminación y ventilación natural de habitaciones. Fuente: Bedoya, 2016.

El proyecto Tierra Biohotel es importante en el campo de la construcción sostenible porque en este convergen distintas estrategias de sostenibilidad:

- Diversificación de fuentes para el abastecimiento de agua (del nivel freático, agua lluvia y la suministrada por la empresa municipal de acueducto).
- Energías alternativas mediante el uso de paneles solares en la cubierta del hotel.
- Climatización pasiva mediante estrategias bioclimáticas.
- Implementación de procesos constructivos sostenibles, como coordinación dimensional de mampostería, recirculación de agua para la confección de concretos en obra, biodesmoldantes

para el vaciado de estructuras de concreto, y utilización en un 100% de bloques de concreto reciclado.

CONCLUSIÓN

Los autores del presente texto ven posible la implementación de una actividad constructora reflexiva en cuanto a su relación con la estabilidad ecológica de los territorios. Tanto en viviendas como en la construcción comercial e institucional, se cuenta con proyectos que ya demuestran un desempeño sostenible desde su materialidad, consumos de energía y agua, y también una óptima habitabilidad en lo que se refiere a iluminación y renovación permanente de aire. A lo anterior se suma que Colombia poco a poco viene legislando para incentivar políticas de construcción sostenible mediante incentivos tributarios, aunque al mismo tiempo viene estableciendo medidas vinculantes que declaran la obligatoriedad de garantizar, por parte de los constructores, la concepción de proyectos que garanticen un comportamiento de bajo impacto ambiental durante su vida útil. Pero no se puede desconocer que los compradores también comienzan a exigir que los inmuebles que van a adquirir sean sostenibles, cuantitativa y cualitativamente.

REFERENCIAS

- Agudelo, L. (2010). *La ciudad sostenible: dependencia ecológica y relaciones regionales. Un estudio de caso en el área metropolitana de Medellín, Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Bedoya-Montoya, C. M. (2018). Construcción de vivienda sostenible con bloques de suelo cemento: del residuo al material. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 20(1), 62-70, <https://doi.org/10.14718/RevArq.2018.20.1.1193>
- Bittencourt, L. (2015). *Introducción a la ventilación natural*. Brasil: Edufal.
- Cano-Restrepo, E. (2014). *Agua lluvia para uso no potable en edificios de vivienda en altura. Incidencias legales, ambientales, técnicas y económicas*. Naranjal, Medellín, Colombia [trabajo de grado de maestría]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Echavarría, C. (2017). *Diseño de uniones de madera reforzada*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, Ideam (2019). Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/pronosticos-y-alertas/información-diaria-de-precipitación-y-temperatura-de-los-principales-aeropuertos-del-pais>
- Salazar-Trujillo, J. (2006). *Diseño de sombras*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Sakai, K. (2009, 20 de noviembre). Recycling concrete: the present state and future perspective. *TCG-JSCE Joint Seminar*. Atenas, Grecia.

Capítulo 5

Gestión de la construcción para una era digital. Tecnología, transformación y cooperación como retos del ejercicio pedagógico en la gestión del diseño y la construcción de edificios

Carlos Andrés Rúa Machado

Profesor Asistente
Universidad Nacional de Colombia

INTRODUCCIÓN

La creatividad, la capacidad de desarrollo e innovación del ser humano es ilimitada y, aunque puedan surgir barreras, siempre logrará establecer mecanismos para dar respuesta a una necesidad constante de transformación o adaptación frente a los retos que la misma dinámica global impone conforme pasan los años.

Hemos entrado en una era de cambios acelerados y de novedades constantes que, pese a nuestras condiciones y limitaciones geográficas de región, la penetración de la tecnología y sus múltiples avances han impactado de forma muy rápida todos aquellos escenarios de formación y desarrollo productivo en los que nuestra cultura se apoya para dar respuesta a las necesidades de profesionalización particular. Si bien nuestros índices de innovación y desarrollo tecnológico local, tanto en lo académico como en lo gremial, han sido incipientes, las aplicaciones, modelos de gestión y desarrollos creados en otros países son una constante de adopción permanente y recientemente se han convertido en un “boom” para ganar terreno frente a la necesidad de mejorar en nuestra propia competitividad, especialmente en el sector constructor, donde hemos tenido grandes rezagos.

Según la Cámara Colombiana de la Construcción (Camacol-Sena, 2015), “existe una brecha tecnológica de 20 años, con deficiencias en toda la cadena de valor y, además, un alto índice de resistencia al cambio”, aspecto que en esencia está determinado por nuestro grado de madurez en cuanto a la gestión de la construcción, la cual no debe limitarse

a estudios de productividad en proyectos de construcción o gestión organizacional a nivel de empresa.

La gestión de la construcción demanda una articulación mucho más amplia y en este sentido es imperativo desarrollar una visión de conjunto que permita entender cómo se articula toda la cadena de valor; donde la academia es un actor relevante, no solo por sus procesos de formación y objetivos de aprendizaje de sus estudiantes frente a las necesidades del gremio, sino también como un actor para “sinergizar” estrategias de investigación, cooperación y extensión, que permitan una evolución conjunta sobre el reconocimiento de los ciclos económicos, tendencias tecnológicas y desarrollo de los modelos de gestión a partir de estándares y normas internacionales, retos que deben asumirse de forma activa para capitalizar oportunidades y mitigar riesgos asociados a los escenarios de cambio, generados por la llamada industria 4.0 o cuarta revolución industrial.

Nuestro país, de acuerdo con el Informe Nacional de Competitividad (INC) (Consejo Privado de Competitividad, 2018), ha crecido en lo social y lo económico durante los últimos quince años; sin embargo, este informe indica que el desarrollo en aspectos de productividad, generación de valor e innovación son una problemática que está lejos de reflejar niveles óptimos. En ciencia, tecnología e innovación, ocupamos el puesto 73 entre 140 países, aspecto que refleja en cierta medida que somos un país seguidor (no desarrollador). La tasa de eficiencia que se reporta en este informe frente a la innovación es del 0,5, ocupa el puesto 12 entre 16 países en Latinoamérica.

Al respecto, Eslava (2019) indica que, en las empresas, estos bajos niveles de productividad se asocian a las capacidades gerenciales, es decir, a la gestión. La investigadora, una de las autoras del informe, señala que estamos lejos de adoptar prácticas que mejoren la productividad y hacer seguimiento de procesos, aspecto que es fundamental para cualquier sector que pretenda crecer y generar valor de forma sostenida en el tiempo.

Esta situación no es ajena al sector constructor. Durante los últimos años se han hecho evidentes en nuestro país las debilidades y deficiencias

en cuanto a cómo se desarrollan los proyectos de edificación e infraestructura, teniendo como resultado proyectos fallidos, desplomes, pérdidas de vida, sobrecostos y plazos incumplidos; estos últimos, como un factor común en la mayoría de los proyectos. La confluencia de elementos detonantes, como la falta de control, falta de integración interdisciplinar, problemas en la contratación, malas prácticas constructivas, diseños incompletos u omisiones frente a requisitos técnicos o normativos, hacen que los riesgos sean cada vez mayores y las pérdidas incalculables, razón por la cual es necesario evaluar desde distintas perspectivas medios y métodos, sobre cómo establecer mecanismos para corregir o mitigar lo que ello genera, además del deterioro de la imagen y la reputación del sector.

Históricamente nuestra formación ha estado orientada a criterios de eficiencia y creatividad, pero con el agravante de desarrollarla bajo escenarios estables, sesgados y tendientes a dar respuestas estereotipadas, que en la mayoría de los casos incorporan las condiciones reales del contexto, donde los factores de variabilidad condicionan todo el tiempo la forma en que tomamos decisiones en los proyectos. En el ejercicio profesional, las realidades y externalidades del escenario global (innovación, tecnología, cultura, economía, etc.), nos suelen perturbar y a su vez nos presionan, incluso por inercia, a responder de forma mecánica herramientas y soluciones que luego no sabemos gestionar e integrar en escenarios cambiantes.

Debemos repensar la lógica de la labor académica como un ejercicio para brindar al estudiante elementos para desarrollar capacidades de relacionamiento e involucramiento, aspectos que son base para sensibilizarnos como sistemas sociales, de tal forma que ganemos a través del tiempo un comportamiento cooperativo capaz de reflejar valores como la confianza personal y la ética colectiva, la transparencia de la información, oportuna y sin omisiones. Estos elementos deben ser marco para apalancar las necesidades del gremio en captura, manejo y gestión de datos. Debemos estimular en los estudiantes objetivos de aprendizaje frente a la gestión de la información y con ella ganar competencias para la previsibilidad, es decir, hacer gestión basada en las personas y en la

sensibilidad humana para abordar la emergencia con analítica de datos, sin que esta se deshumanice por la inteligencia artificial (IA); el factor humano, en la gestión de la construcción, deber ser el verdadero vehículo de transformación.

Los sistemas informáticos son cada vez más complejos e integrados, y estos generalmente se desarrollan muchísimo más rápido que los sistemas humanos, justamente por esto existe una tendencia a sobrevalorar los desarrollos, como el modelado 3D y la realidad virtual como paradigmas de “salvación”. Aunque estos están ofreciendo soluciones a muchas problemáticas de la arquitectura, la ingeniería y la construcción, a su vez exigen cambios en la estructura mental de las personas para entender dinámicas de concurrencia e iteración que aún las personas no saben manejar ni integrar.

La gestión requiere de una estructura que facilite la articulación de experiencias subjetivas y dinámicas objetivas, dada una serie de acontecimientos sobre los que se ejecutan; en ese contexto, los datos y la información definen la significación de la gestión, y los atributos de esta se configuran en función de la singularidad de variables como las cogniciones, las emociones y las conductas, estableciendo así una experiencia única e irrepetible como respuesta a una promesa, que comporta en sí misma una relación entre la realización del ejercicio colectivo (producto y servicio) y la percepción sobre el nivel de satisfacción que interpretan los grupos de interés, incluso más allá de los atributos físicos (Manucci, 2010, p. 151).

Para abordar un futuro tan prometedor como el que tenemos por delante, se requieren procesos de gestión del cambio, espacios para potencializar la formación técnica, con una formación transdisciplinar, capaz de lograr cambios en múltiples niveles, especialmente en la integración de saberes, donde las facultades sean del saber colectivo y no del saber específico, justamente porque ello dará paso a la integración y a la concurrencia de saberes.

Nuestra gestión del cambio como tal ha sido muy efímera, además, tenemos grandes debilidades en la integración interdisciplinar y ello restringe la evolución incremental de los procesos con los que hemos

aprendido y con los que convencionalmente hacemos gestión, tanto en el campo de la formación, como los que se implementan en el marco de un proyecto de edificación tradicional.

Nuestra facultad, e incluso la misma universidad, requiere desarrollar capacidades frente a la convergencia de contenidos entre los pregrados que son comunes a la construcción, es decir, establecer estrategias articuladas que permitan a los estudiantes desplegar su capacidad de relacionamiento frente a objetivos comunes y además establecer redes de aprendizaje colaborativas para formar competencias y habilidades de gestión integrada de proyecto, aspecto clave para capitalizar en la era digital. El costo de oportunidad, si mantenemos el *statu quo* va a ser muy alto.

*El mayor peligro en tiempos turbulentos no es la turbulencia;
es actuar con la misma lógica de antes.*

Peter Drucker

EL PESO DE UNA REALIDAD NO GESTIONADA

Dado que la definición, coordinación y configuración de los equipos de trabajo en los proyectos de construcción es un factor clave de éxito, es necesario sensibilizar y aterrizar criterios metodológicos de formación que permitan corregir la falta de rigurosidad en el seguimiento, el control y la adaptación de los procesos, para, de esta manera, implementar estrategias que mejoren el desempeño y aprendizaje interdisciplinario cada vez y en mayor grado, a medida que la tecnología ofrece soluciones y medios para innovar en la forma en que se gestionan nuestros proyectos, especialmente en la secuencia e iteración del trabajo, además que se trabaje cualitativa y cuantitativamente sobre la forma en que se toman las decisiones a través del uso de tecnología informática (IA, *big data*, *machine learning*, *Blockchain*, etc.) como medio para pivotar la productividad y confiabilidad en el sector constructor, pero nunca sin subvalorar el capital emocional, ya que la lógica de las máquinas opera con reglas y muchas veces las reglas deben ser analizadas bajo parámetros muy particulares que solo el ser humano puede gestionar.

En este sentido, competencias como la comunicación, el reconocimiento emocional, el análisis de información y mapeo de datos, podrán

permitir la proyección y diseño de escenarios para reducir los límites subjetivos de nuestra visión particular y colectiva frente a la variabilidad de los proyectos e incluso la misma condición lineal y tradicional sobre la forma en que se secuencia del trabajo de los profesionales que intervienen en todo su ciclo de vida para ejecutar un proyecto de edificación o infraestructura.

Los problemas de la secuencia de trabajo han sido discutidos durante muchos años. Pese a ello, aún persisten las ineficiencias asociadas a la comunicación, la falta de integración y la ausencia en la aplicación o incorporación de una base metodológica que permita la estructuración mental de los profesionales en los momentos de verdad, desde donde se interactúa interdisciplinariamente para gestionar un objetivo común, aspecto que sugiere todo un campo de estudio sobre el que poco se ha discutido de forma articulada, y más aún, si se mira desde la perspectiva de la comunicación y la integración (Alarcón y Mardones, 1988).

Esta realidad es todo un reto para la facultad y sus docentes en cualquiera de sus especialidades o áreas de estudio, ya que cuando se habla de gestión de la construcción también se deben abordar todas las líneas del saber que componen el ecosistema de conocimientos que allí se tienen, y a su vez hacerlos extensibles coordinada y adaptativamente a otras facultades, donde conocimientos específicos de muchas ingenierías se integran a la base propedéutica del saber en el arte del diseño y la construcción de edificaciones.

La industria revela que uno de los factores que hacen que los proyectos de construcción fracasen proviene de la toma de decisiones durante el ciclo de vida de los proyectos, y a pesar de su importancia no se está dando respuesta integrada a ello y mucho menos se está gestionando el conocimiento para usar las lecciones aprendidas de forma adecuada (Project Management Institute, 2016). Las responsabilidades, los roles y las acciones no suelen tener la atención y relevancia requerida para el logro de objetivos, quedando todo el peso de la gestión sobre el sesgado conocimiento técnico; este enfoque es precisamente considerado como “talón de Aquiles”, que tanto el gremio como la formación académica en general sufren de forma crónica, ya que suele confundirse la técnica con la estrategia, incluso los aspectos técnicos de la gestión de proyectos

que promueve el PMI con su guía PMBOK^{®1} son tomados como metodología y esto dista mucho de serlo, situación que deriva en diversos errores conceptuales, al igual que la adopción de tecnología, que sin pasar por procesos de gestión de cambio, adaptaciones y transformaciones en los procesos y las personas, terminan siendo para muchas compañías un dolor de cabeza frente al éxito de la misma y su promesa de valor.

La complejidad de la interacción humana a través de los flujos de trabajo es un reto que en mi ejercicio profesional siempre me ha preocupado, ya que atender integralmente las partes interesadas en un proyecto es un factor crítico y no se satisface solo con los parámetros técnicos de una guía con la del PMI o sus similares, como por ejemplo la ISO 21500 o el Prince 2, siendo la del Project Management Institute la más aceptada y usada a nivel mundial. Este tipo de estándares deben ser adaptados y contextualizados, de manera que a partir de ellos se desarrollen métodos y metodologías específicas para su aplicación al diseño y la construcción de edificios u obras de infraestructura. Tal ha sido esta orientación que, en algunos proyectos, mi rol como “director” lo he mutado, adaptando la gestión a un ejercicio más de coordinación metodológica, fundamentalmente porque en el entendido local, el ejercicio de la profesión de dirección de proyectos no es como se lee en aquellos países que tienen esto como premisa. En nuestro contexto pesa más un rol funcional que el rol de director de proyecto.

Un director o, mejor, gestor de proyectos, gestiona en función de protocolos coordinados de comunicación, manejo de la información e involucramiento de interesados de forma transparente y ética, acciones que históricamente han sido poco desarrolladas o exploradas en el sector de la construcción, dada su orientación a lo técnico y que deben ser objeto de estudio cuando se habla de gestión de la construcción, puesto que implica mucho más de lo que se ha documentado.

Los bajos índices de éxito, en los proyectos de construcción, corresponden a la forma en que los estamos desarrollando. Existe una condición de linealidad en los procesos de diseño, y su carácter de etapas

¹ PMBOK es una marca registrada del Project Management Institute (PMI).

segmentadas hace que se pierda información o se omitan aspectos que son valiosos para la calidad del trabajo. La siguiente figura representa esta situación y muestra que el enfoque tradicional (diseño-oferta-construcción) carece de integración; es un efecto “cascada” en el que se generan múltiples reprocesos en todo el ciclo de vida, aspecto que se convierte en un desafío para la formación profesional y a su vez para quienes intentan implementar tecnología paramétrica en el desarrollo de diseños y ejecución de obras.

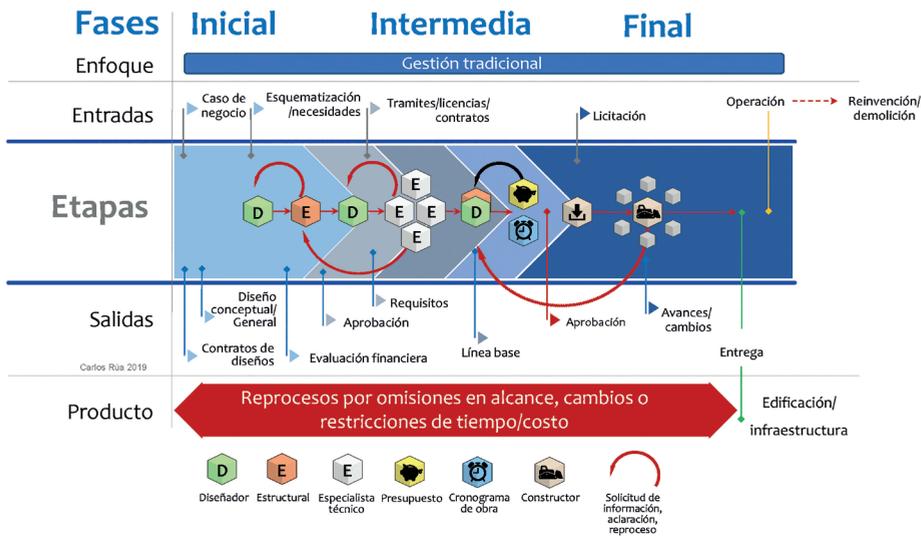


Figura 1. Ciclo de vida tradicional de gestión en la construcción de una edificación. Fuente: elaboración propia².

La principal problemática radica en la poca interacción entre los especialistas; esta situación obliga a las siguientes fases a trabajar en diseños incompletos, por lo que las consecuencias son soluciones parciales y, además, sistemas o procesos carentes de constructibilidad, múltiples riesgos y un gran número de órdenes de cambio (rediseños y reprocesos de la construcción) (Alarcón y Mardones, 1988)

Cuando se usa el término constructibilidad se hace referencia a un sistema metodológico y un enfoque de la gestión que procura

² Adaptación de conferencia “El fenómeno BIM, Expo-proyectos” (Rúa Machado, 2019).

una adaptación integrada de criterios y conceptos que permitan que el producto del diseño será construible y se maximice el valor para todas las partes. La Asociación de Investigación en la Industria de la Construcción e Información (Ciria, 1983) define constructabilidad como: “la metodología que proporciona al diseño del edificio la facilidad de construcción, estando sujeta a todos los requerimientos necesarios para llevarla a cabo”. Pero la definición que mejor se acopla a hacer gestión de la construcción es la precisada por el Construction Industry Institute (CII, 1986), el cual la establece como: “Sistema para conseguir una óptima integración del conocimiento y experiencia constructiva en las operaciones de planificación, ingeniería y construcción, orientado a tratar las peculiaridades de la obra y las restricciones del entorno con la finalidad de alcanzar los objetivos del proyecto”.

Es una definición que se enfoca al relacionamiento e interdependencia del diseño con la construcción, reconociendo la trascendencia de la toma de decisiones en la fase de conceptualización y diseño. Aquí se incluyen los criterios de diseño, concepto de diseño, diseño de procesos, diseño de productos e ingeniería de detalle, aspectos que siguen siendo un problema común en la construcción, pese a estar plenamente identificados y definidos a través de modelos y sistemas por autores tan reconocidos como Glenn Ballard, Greg Howell, Lauri Koskela, precursores de los enfoques Lean, o construcción sin pérdidas, y quienes dieron origen al reconocido Lean Construction Institute, cuya principal premisa es desarrollar criterios y mejores prácticas de gestión para incrementar el valor del cliente y mitigar el desperdicio derivado de omisiones, mala planificación y manejo eficiente de procesos.

La problemática actual de no seguir adecuadamente procesos, incrementarlos y adaptarlos, hace que no se puedan gestionar y usar datos de forma sincrónica, confiable y parametrizada como requisito del aseguramiento de la calidad de la información, situación que comprobadamente ha generado vacíos, falta de consenso y un sinnúmero de errores que terminan condicionando la ejecución de los procesos en obra, y peor aún, generando patologías y dificultades posteriores a la entrega que terminan impactando a los usuarios finales.

En respuesta a ello, las iniciativas que están involucrando herramientas de modelamiento digital y buscando adoptar medios y sistemas de información, asociados al concepto de digitalización en la construcción, están comenzando a ganar terreno en Colombia en cuanto a la mejora de la calidad, la eficiencia y la trazabilidad de la información. Estamos frente a un cambio de mentalidad, y ello también obliga a la academia a “sacudirse” de forma activa, proactiva y participativa para no quedarse relegada con la tendencia del gremio a ir adoptando tecnología, fundamentalmente aquella asociada al paradigma Building Information Modeling (BIM).

El BIM se reconoce ahora como un escenario de colaboración, mediante, datos, modelos 3D, metodologías, protocolos, procesos y herramientas para el diseño y la coordinación paramétrica de la información digital que se crea en distintas plataformas, y cuya convergencia debe obedecer a mecanismos de transparencia y seguridad que deben ser configurados y orientados con criterios de gobernabilidad claros, vinculando a una base de gestión que solo la puede dar una estrategia adaptativa que contemple un estándar de gestión o dirección de proyectos. Así, ese criterio establecido por el Construction Industry Institute, hace más de treinta años, podría tomar su real dimensión y valor.

Si bien estos desarrollos asociados al modelado de la información de la edificación (*software, hardware, open source*, entre otros) ofrecen soluciones que pueden acelerar, y mejoran los procesos de gestión de la construcción, es imperativo cuestionarse, en el escenario académico, sobre la forma en que los profesionales se están formando e insertando en los entornos de trabajo digital y cómo ello les puede permitir realmente la capitalización de BIM como un sistema de colaboración o práctica integrada para la eficiencia y productividad del sector; además de entender cómo ese concepto de trabajo colaborativo se complementa con prácticas de gestión reconocidas, como el Project Management y la filosofía Lean Construction, de tal manera que los diseños y contenidos de los programas curriculares hagan más evidente su respuesta y propuesta de valor sobre estas temáticas, además, que estos replanteamientos tengan la capacidad de adaptarse rápidamente en el tiempo a medida que la tecnología y las prácticas de gestión replantean nuevas formas de hacer y pensar.

En respuesta a estas condiciones, muchos profesionales, diseñadores y empresas han estado aplicando e incorporando de forma gradual sistemas de información, modelos, medios de gestión y desarrollos para digitalizar los procesos que se acometen en el quehacer diario del sector constructor, con el fin de atender de mejor forma su ejercicio profesional, su promesa de valor o su oferta de servicios, especialmente en la fase de conceptualización y diseño.

En lo académico aún no se notan con claridad los avances de forma integrada, si bien algunos programas están incorporando elementos relacionados con este cambio tecnológico, en general se refleja una situación de incertidumbre, timidez y desconocimiento colectivo, ya que se especula mucho al respecto. Solo algunos docentes, “pioneros” en estas temáticas, han logrado implementar y adaptar este tipo de conocimiento en sus aulas, incluso, delante de la resistencia de muchos.

No obstante, estas iniciativas, en la mayoría de los casos analizados³ (profesionales, empresas e instituciones académicas), han generado dudas y ambigüedades sobre cómo los docentes, los profesionales o las empresas lo deben hacer de forma integrada; es decir, la forma en que deben confluir los criterios y procesos para entender cómo la adopción y la transformación digital pueden cambiar nuestros bajos índices de productividad y competitividad con relación al sector constructor, y necesariamente con relación a los programas académicos que deben proveer el capital humano para los escenarios innovadores y retadores del futuro inmediato.

Para cualquiera de estos actores o grupos de interés es pertinente la comprensión sobre qué implican los términos “digitalización”, “transformación” y “era digital” en el sector constructor, y cómo estos deben tomar forma desde la gestión, ya que no debe reducirse a un aspecto de herramientas (*hardware* y *software*) o tecnología en sí. Una visión amplia del asunto debe involucrar diversas perspectivas y para cada una de ellas, en su propio posicionamiento, debe permitir el espacio de posibilidad para una reconstrucción del conocimiento de forma integrada

³ El autor ha estado vinculado a varios proyectos asociados a la transformación digital con el Clúster Hábitat sostenible de la Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia.

social, ética y sostenible en el tiempo. No se trata solamente para dónde vamos, también hay que reflexionar sobre el “cómo venimos”.

La gestión de la construcción aún no se ha desarrollado por completo y ello en sí planea la creación de escenarios de discusión, en los que se expongan ideas y se construyan colectivamente criterios sobre qué es o cómo debe ser concebido el concepto de gestión de la construcción, en relación con la era digital que se avecina y cómo ello se establece desde nuestra propia realidad y contexto nacional. En muchos casos, las instituciones académicas creen enseñar gestión, y como profesionales creemos que hacemos gestión, pero lo que en realidad sucede es que operamos de forma improvisada y reaccionamos a las situaciones de cambio sin llevar procesos ni establecer métodos coordinados de trabajo, difícilmente integramos, e incrementamos con eficiencia los procesos que ejecutamos.

Nuestros patrones de conducta reflejan linealidad y segmentación y aunque se piense que trabajamos por ciclos PHVA, el peso de la realidad nos muestra que no se ha entendido por completo qué es hacer gestión, qué es trabajar por procesos, qué es un sistema de gestión o qué es establecer estrategias para hacer gestión; solo basta con mirar las noticias y revisar los casos que tenemos a nuestro alrededor para validar esta afirmación. Muchos cuentan con procesos y sistemas integrados, pero infortunadamente sus resultados no evidencian una cultura de gestión sobre esos activos, por lo que lamentablemente hay que decir que no están siendo capitalizados, es más, se están tornando en una piedra en el zapato para lograr una transformación que genere valor en el tiempo con respecto a la era digital.

Las transformaciones que son capaces de desarrollar cultura sobre una base sostenible y un posicionamiento sistémico hacia el entorno logran establecer estrategias claras y por ende mejor capacidad de acertar acciones para implementar el cambio, así como conocer sobre el momento oportuno de actuar. (Garbanzo-Vargas, 2015). Esta idea se corresponde plenamente con aquella famosa frase de Peter Druker: “La cultura come estrategia al desayuno”. Ambos planteamientos son indicadores claros sobre el valor que puede generar una empresa o un colectivo integrado con relación a uno o varios objetivos en común; para nuestro caso como

facultad, el no desarrollar una cultura y tener muy claro nuestros procesos de gestión académica y adaptación curricular harán que cada isla del saber agregue al sistema de conocimientos (ideas y conceptos) criterios desarticulados e incluso divergentes que podrían magnificar la ineficiencia de la academia frente a las necesidades del sector, trastornando por consiguiente el ecosistema económico, social y cultural de la región.

El alto grado de fragmentación que señala Camacol sobre nuestro campo de acción es un reflejo de la ausencia de colaboración y, más que ello, de la ausencia de cooperación. Esta situación debe ser objeto de estudio constante en el ámbito académico, para que a través de procesos de investigación se pueda aportar conocimiento y alternativas por medio de publicaciones indexadas. Tenemos una gran oportunidad por delante y la percepción de futuro es muy positiva, nuestro proyecto científico, cultural y colectivo de nación seguramente nos pondrá en acción frente a aquellas soluciones que demanda la construcción para crear unidad y enriquecer el patrimonio colectivo inmaterial del país, es decir, participar y fomentar la capacidad creativa e intelectual de todos los actores posibles para saltar al futuro de la construcción con capacidades integradas en la formación de profesionales de alto valor para el sector y sus públicos objetivos.

Mossman (2020), señala que, desde la década de 1930, solo el Gobierno del Reino Unido ha encargado más de quince informes destinados a tratar de mejorar la forma en que opera el sector constructor, y de igual forma, afirma que también lo han hecho Estados Unidos y otros países. Del mismo modo, el Foro Económico Mundial (WEF, 2016) expone, en uno de sus informes, dichas condiciones y propone un marco de transformación que enumera treinta medidas, respaldadas por diversos sectores, entre las cuales se puntualiza que las prácticas integradas y un alto sentido de cooperación serán un factor clave de progreso en toda la cadena de valor y aunque no lo hace explícito, no nos debe quedar duda de que la incidencia de la academia, en conjunto, es un eslabón que se debe sumar a esa misión.

Tenemos un doble reto: el primero, mejorar nuestra cohesión interdisciplinar, y el segundo, modular los saberes para transformar

adecuadamente el diseño de contenidos que permitan la integración de los pregrados conforme el medio profesional lo necesita y a su vez estar en constante adaptación e integración con el gremio, justamente porque los desarrollos nunca se detendrán. Nuestra cultura deberá ser adaptativa y esencialmente colaborativa.

Como estudiante siempre tuve la percepción de que nuestros pregrados iban por vías distintas, incluso no tengo en mi memoria haber tenido una asignatura disciplinar en la que pudiese interactuar con estudiantes de otras carreras, aspecto que como docente he visto que modestamente ha empezado a cambiar, pero aún queda mucho por hacer. Tanto la arquitectura como la construcción se amalgaman en la práctica, e incluso convergen, en la dinámica de proyectos, profesionales de distintas ramas y saberes, lo que exige a nuestros egresados tener capacidades y competencias para entender esa interacción, socialización, y por consiguiente, cooperación con otros en su ejercicio profesional. Desde aquí podría replantearse el concepto de “gestión de la construcción”, ya que todos los factores involucrados en la transformación digital que se está dando actualmente en el sector sugieren que cada actor repositone sus conocimientos y habilidades en términos de unificación, consolidación, comunicación e interrelación iterativa.

Integrar la diversidad en este contexto permite entender con mayor amplitud que las nuevas tecnologías y soluciones informáticas entrañan y promueven una cultura colaborativa que va más allá de su significado convencional, ya que desde distintas plataformas y sistemas de comunicación es posible asegurar los objetivos y expectativas de cada una de las partes frente a un resultado común, justamente porque son estos medios los que le dan soporte a modelos de trabajo autogestionados, es decir, canalizan las interdependencias y suscitan modelos emergentes de gestión, como la holocracia o los sistemas holocráticos⁴, donde la jerarquía pasa del dominio a la realización.

⁴ El concepto holocracia se deriva del término holarquía, acuñado por Arthur Koestler (1967). Un sistema holocrático hace referencia a la capacidad del ser humano para interactuar con criterios independientes dentro de un sistema colaborativo sin jerarquías, es decir, la habilidad de construir respuestas o soluciones con criterios independientes y a su vez complementarios entre sí. Para profundizar en este aspecto, se sugiere al lector el libro de Frederic Laloux, *Reinventar las organizaciones* (2015).

La ausencia de integración, tanto en el sector productivo de la construcción, como en los escenarios académicos, nos ha limitado y condicionado enormemente para evolucionar el concepto de gestión de la construcción y esa realidad no gestionada nos ha demostrado, a través de múltiples hechos, que como profesionales y como docentes, dentro de la cadena de valor en la economía de la construcción, tenemos que comenzar a cambiar y transformar las ideas de forma frontal. Como agentes de procesos de aprendizaje debemos permitirnos la realización colectiva, y ello implica un estado de ánimo activo, participativo y esencialmente cooperativo, donde los egos se transforman a perspectivas mucho más refulgentes.

ARGUMENTOS PARA LA DIGITALIZACIÓN Y UNA VISIÓN DE FUTURO

Pensar la gestión de la construcción en un escenario digital debe ser una apuesta de apertura e innovación pura, en la que se integren modelos de pensamiento disruptivos y retadores. Podríamos decir que se trata de un ejercicio progresivo capaz de dialogar en distintas direcciones y negociar con sus particularidades y sesgos autorreferenciales, un pensamiento complejo que diste de la simplificación, justamente porque integra la emergencia, la innovación y la capacidad de adaptarse a un conocimiento que coexiste con la singularidad del cambio (Morin, 2011).

Dado que el escenario a futuro de la gestión de la construcción propone procesos de renovación, de lo analógico a lo digital, es necesario analizar dos dimensiones básicas sobre la cuales se puede hablar de “digitalización”. La clave de todo esto radica en la información, la coordinación y la predictibilidad de los procesos, elementos que son inherentes a la gestión; sin embargo, cada uno de estos implica la exploración de estrategias y el estudio de modelos y enfoques metodológicos que exigen cambiar la lógica organizacional e incluso los contenidos académicos para estar en frecuencia con las prácticas que habilitan el cambio y la adaptación (Mckinsey-Camacol, 2017).

La figura 2 representa las dimensiones, foco de análisis desde las cuales se desprende un ciclo de digitalización: la primera hace referencia a

la capacidad de adopción y la segunda a la capacidad de transformación; cada una de ellas conlleva una serie de variables que para cada posición en particular (actor) sugiere una contextualización y una autoevaluación de lo que representa su *now how* con relación a la tecnología y lo que esta puede brindar en sus propios espacios del saber y el hacer, al tiempo que este mismo saber-hacer se modula con otro u otros saberes, configurando una “red” o mejor un “sistema de conocimiento adaptativo integral” para cada escenario de actuación, pero que sufre los sesgos de la referenciación, es decir, la búsqueda inconsciente o irracional de hacer o aplicar lo mismo que otros han hecho en otro lugar, sin el reconocimiento esencial de las condiciones culturales intrínsecas donde se aplica, a esto se le conoce como “efecto halo”⁵.

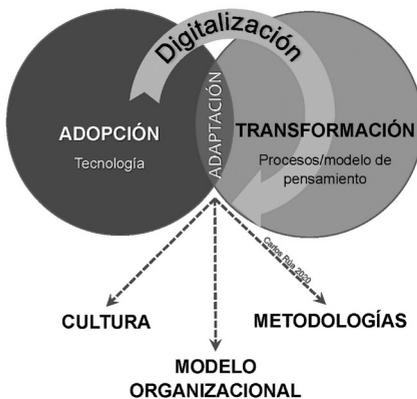


Figura 2. Dimensiones del ciclo de la digitalización.
Fuente: elaboración propia.

En primera instancia, la adopción se debe entender como el reconocimiento y la apertura hacia la tecnología, es decir, existe una aceptación plena y comprometida respecto de los valores (tangibles e intangibles)

⁵ Término acuñado por Thorndike (1920) en su publicación “A constant error in psychological ratings”, *Journal of Applied Psychology*. El efecto halo consiste en un error asociado al sesgo cognitivo, donde se toman acciones o juicios en condiciones de escasos datos y elevada incertidumbre, presuponiendo que una capacidad o atributo que funciona en un contexto será igualmente útil o funcional en otro.

que otorga la evaluación crítica, la incorporación e implementación de herramientas o medios tecnológicos que facilita la competitividad, y en segunda instancia, dado el proceso de adopción, viene la transformación, la cual es una lógica dura de era digital, ya que no hay cambio o disrupción sin que se replanteen las formas de hacer y discernir, especialmente usando los desarrollos tecnológicos o proponiendo adaptaciones y mejoras a los mismos, lo que *per se* implica un cambio mental.

La transformación tiene mucho que ver con la adaptación de la forma de pensar; una expresión de Carl Sagan⁶, a quien he seguido y leído desde niño, y que al escucharla se ha adherido profundamente en mi memoria dice: “La ciencia es más que un cuerpo de conocimientos, es una forma de pensar”⁷, cuando hablamos de tecnología o digitalización, implícitamente está involucrada la ciencia, ya que estos desarrollos se dan a partir de las ciencias computacionales y ciencias matemáticas. Esta analogía sugiere que la digitalización es mucho más que artefactos, herramientas o plataformas; la incorporación de tecnología y sistemas de información no resuelve el problema, hay que renovar las estructuras mentales, los hábitos y los comportamientos para constituir una forma de pensar que saque un continuo provecho de las innovaciones tecnológicas. Esta nueva forma de pensar debe ser adaptativa, integradora y esencialmente emergente, ya que los cambios e innovaciones que ofrecen las plataformas digitales difícilmente se detendrán; la linealidad y la previsibilidad aparente de un sistema controlado comenzará a desaparecer y por ello nuestro estado mental tenderá a una condición “beta” en la que pensar de forma cooperativa será una constante y estará muy relacionada al control del ego, ya que este engendra miedos y condiciona la evolución de la confianza, característica necesaria para el trabajo colaborativo, y por ende, para la gestión de la construcción.

Al hacer referencia a Sagan, pretendo también llamar la atención sobre sus cualidades de exploración y escepticismo crítico, ya que estas

⁶ Astrónomo, astrofísico, cosmólogo, astrobiólogo, escritor y divulgador científico. Autor de *Cerebro de broca* (1979), *Cosmos* (1980), *El mundo y sus demonios* (1995), entre otros.

⁷ Entrevista con Charlie Rose, 27 de mayo de 1996. La expresión original en inglés: “science is more than a body of knowledge. It’s a way of thinking”.

son fundamentales para formar una estructura mental capaz de interpretar las condiciones de cambio, y en función de ello, evaluar diversas ópticas para abordar escenarios con soluciones adaptativas y coherentes en momentos y realidades específicas. Esta condición es aplicable a nivel organizacional, institucional y especialmente en la gestión de proyectos, los cuales se ven más impactados por la condición de cambio o rotación de sus actores.

Esta condición de rotación o cambio de actores, para cada proyecto, ha sido un factor que incide en la problemática de la cooperación y coordinación, dado que difícilmente se coordinan los criterios y se configura un lenguaje que fortalezca las relaciones. Esta situación no solamente la he vivido en mi ejercicio como coordinador de proyectos, sino también como facilitador en los proyectos de transformación digital que he desarrollado con el clúster Hábitat sostenible de la Cámara de Comercio. En la mayoría de los grupos de trabajo hubo disparidad de criterios sobre cómo se coordinan procesos que son interdependientes, y a pesar de que operan en un gremio en común, les cuesta generar consenso para establecer entregables en condiciones de concurrencia y simultaneidad, es decir, que al desarrollar información de forma articulada y en tiempo real se hace difícil la convergencia.

Por otro lado, también se evidencia la ocurrencia del “efecto halo” en las decisiones de adopción de tecnología. Algunas empresas han invertido grandes recursos y tiempo para incorporar *hardware* y *software*, y han entrado en procesos de capacitación sobre el uso y manejo de estas herramientas sin lograr ningún progreso o cambio que demuestre una mejora en los resultados. La percepción es que hay elementos en la aplicación de los procesos de gestión que no se están tratando de forma integrada, y algunos de estos tienen que ver con la comunicación y la forma en que se coordinan las personas para trabajar de manera concurrente. La transformación requiere exploración, autoevaluación, autoconocimiento, referenciación y replanteamiento de procesos y el factor más sensible de todo esto no es la tecnología en sí, sino las personas y cómo interactúan con flujos de información más instantáneos.

En un proceso de transformación, el capital humano debe ser el principal elemento que se gestione; ello sensibiliza al involucramiento de los interesados y la autoorganización. Esto también es parte de la gestión de la construcción. Nada puede desarticularse cuando se estructuran intervenciones frente a una verdadera transformación, por lo tanto, habrá que pensar con detenimiento cómo se establece una estrategia de integración que permita conjugar la significación del cambio desde el ser y cómo ello engrana con modelos y acciones de crecimiento y realización.



Figura 3. Correspondencia entre niveles de intervención y la profundidad del cambio.
Fuente: adaptado de Manucci, 2010.

El esquema propuesto hace referencia a las condiciones de evaluación y desarrollo que deben tratarse para transformar y adaptar la estructura mental de un colectivo o un agente en específico frente a un proceso de renovación. La incertidumbre que genera el cambio de un modelo de gestión puede ser muy desconcertante; sin embargo, es necesario plantear esquemas que faciliten la comprensión y la adaptación. No hay soluciones predeterminadas, por lo que los modelos aplicados deben ser una construcción colectiva que permita acuerdos y estrategias que fortalezcan la capacidad de movimiento dentro del sistema tratado.

Manucci (2010) indica:

La incertidumbre que enfrenta un líder de hoy está relacionada con la dificultad para observar, para diseñar y gestionar sus acciones en territorios inéditos. Adicionalmente, las decisiones y los movimientos

personales también influyen en la complejidad del contexto, donde cada una de las intervenciones locales en un sistema inestable impacta en la dinámica general. (pp. 43-44)

Esto influye mucho en la gestión como tal y plantea un abordaje mucho más amplio e integrador, trascendiendo lo técnico, donde varios se quedan refugiados porque su límite subjetivo no les permite ver más allá de su mapa intrínseco de la realidad.

Tanto para el profesional o las empresas del gremio como para la academia, el especular en digitalización, solo pensar en adoptar tecnología es un gravísimo error; hay todo un campo de la gestión del cambio y del conocimiento, entre otros aspectos, que deben explorarse para realmente alcanzar resultados de transformación contundentes. Nuestra forma de proceder debe cambiar y por ello la articulación iterativa del saber requiere, desde estas dos dimensiones, que se profundicen temas en los que se pueda desarrollar colectividad interdisciplinaria e incluso transdisciplinaria como mecanismo para descifrar las claves de nuestra perspectiva académica y profesional de lo que debe ser la gestión de la construcción en la era digital.

Hoy podemos ver cómo el paradigma de trabajo lineal se replantea. Las tecnologías brindan medios y herramientas de integración paramétrica, y en estas, casi cualquier disciplina que confluya en procesos de diseño o desarrollo de proyectos de construcción, puede tener la oportunidad de vincularse de forma digital y sincrónica con otros, y en función de ello, desarrollar, tramitar o gestionar información, transformando los principios de relación e interacción profesional, es decir, interactuando con todo un escenario abierto a una nueva forma de pensar la gestión de la construcción.

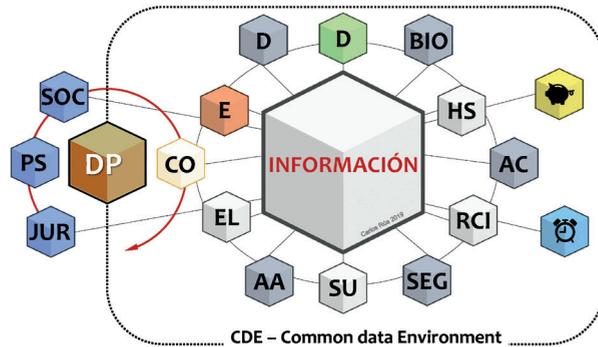


Figura 4. Esquema de trabajo interdisciplinar y transdisciplinar para un proyecto.
Fuente: elaboración propia.

DP (Dirección del proyecto), D (Diseñador), E (Esp. Eléctrico) BIO (Bioclimática), HS (Hidrosanitario), AC (Acústica), AA (Aire acondicionado), SU (Suelos), RCI (Redes contra incendios), CO (Constructor), DP (Dirección de proyecto/Interventoría), SOC (Sociólogo), PS (Psicólogo), JUR (Jurídico), entre otros.

La figura 4 muestra el tipo de escenarios de trabajo para el que deben estar preparados nuestros egresados y más aún los profesionales que ejercen su labor en el escenario productivo, pero esto es solo la “cabeza del iceberg”. Para que exista una correcta inserción de los profesionales en un entorno común de datos (Common Data Environment, CDE)⁸, como lo propone BIM, deben explorarse competencias y habilidades para la coordinación de los procesos de integración y manejo de la información, así mismo como el diseño de procedimientos y protocolos, ya que en este esquema surgen dudas sobre aspectos de propiedad intelectual, secuencia e iteración de trabajo, seguridad de la información, aplicación normativa, entre otras.

Aunque los estándares y las prácticas relacionadas con BIM involucran los aspectos técnicos del manejo de la información a través de planes y protocolos, no queda claro metodológicamente cómo se puede lograr que los procesos de entrada de datos sean eficientes, correctos

⁸ Fuente de información utilizada para recopilar, gestionar y difundir documentación de los modelos gráficos y los datos no gráficos para todo el equipo del proyecto (es decir, toda la información del proyecto ya sea creada en un entorno BIM o en un formato de datos convencional). La creación de esta única fuente de información facilita la colaboración entre los miembros del equipo del proyecto y ayuda a evitar duplicaciones y errores.

y que la conjunción de estos con otros pueda medirse y monitorearse para determinar su grado de madurez y confiabilidad como mecanismo de aseguramiento del alcance, y así mitigar los errores o las omisiones relacionadas con la información.

Frente a este tipo de condiciones surgen tecnologías como Blockchain y Hashgraph, las cuales encriptan los datos y los encadenan, dando a la información niveles de incorruptibilidad muy altos, aspecto que beneficiaría mucho al gremio, especialmente a proyectos públicos, donde tantos casos se han dado de malversación de recursos. La visión de futuro con este tipo de desarrollo augura escenarios de mayor confiabilidad y transparencia, no solo dentro de los sistemas de información, sino también en los entornos de trabajo y las relaciones entre disciplinas intervinientes, aspectos que también serán objeto de estudio continuo para la gestión de la construcción en el futuro.

Nuestro devenir académico también tiene como desafío la comprensión activa de un mercado que cambia al ritmo de la innovación tecnológica, realidad que sugiere trazar objetivos para evolucionar los planes y los contenidos curriculares de forma ágil. Nuestros estudiantes poseen una estructura mental muy distinta y particular, por lo que el conjunto de competencias y habilidades a desarrollar en cada disciplina debe transformarse constante e integradamente con las demás.

El valor de un programa académico reside en la respuesta que se ofrece a las aspiraciones de felicidad y realización de cada generación y no de sus docentes, incluso sin la necesidad de la obtención de un título profesional. El replanteamiento académico tiene mucho por debatir y esa será nuestra mayor empresa. Entender cómo evolucionan los perfiles profesionales a competencias certificadas también será otro argumento para repensar los objetivos de formación y competencia con los modelos no formales que cada vez irán sofisticando su oferta, y ganando mayor respaldo de las compañías que buscan talentos con habilidades específicas de alto impacto y valor.

Esta orientación, efectivamente abre el escenario de gestión a metodologías y prácticas académicas que van más allá de los desarrollos informáticos y paradigmas del pasado; tal es el caso del Integrated Project

Delivery (IPD), cuyo enfoque replantea el modelo tradicional en cascada, y propone, más allá de un sistema de contratación, un modo de trabajo donde las interacciones de los actores se ejecutan de forma integrada y más anticipada, y tienen como principio filosófico la interdependencia y niveles de conciencia cooperativa y confianza muy altos.

Muchos modelos o sistemas de gestión como este comienzan a ganar auge en el mundo y en el escenario académico deben ser objeto de estudio y concertación interdisciplinaria (ingenieros, arquitectos, administradores, constructores, etc.), dado que su práctica exige el establecimiento de criterios interdisciplinarios y transdisciplinarios para definir las perspectivas de valor que puedan darse en este tipo de esquemas.

El futuro de la gestión de la construcción dependerá también de cómo se cambian los modelos de contratación y cómo se abordan los desafíos que enfrentamos para acometer la movilización temprana de la fase de construcción (obra), entendiendo el impacto en el rendimiento cuando se comienzan a construir demasiado pronto, y sin desarrollar, metodologías de preparación mucho más ágiles. Esto también deberá ser objeto de discusión para los saberes que confluyen en proyectos de construcción, puesto que la formación deberá preparar a los estudiantes para escenarios muy distintos a los actuales.

ENTENDER LO QUE HACEMOS Y RECONOCERNOS PARA CAMBIAR

Estamos en una evolución informática que crece gradual e incrementalmente, y lanzar una estrategia que afronte ese cambio se vuelve esencial para cualquier actor que pretenda ser competitivo en los próximos años. Estamos frente a un contexto con una semántica basada en ciencia de datos, gestión de la información y comunicación, por lo que los aventajados y transformadores del sector, que son los dinamizadores del cambio, deben ser los referentes para la creación de “puentes” que permitan entender lo que el gremio en general está interpretando de sus desarrollos. Conectar con los desarrolladores nos debe permitir entender los mecanismos de acción, y con ello, la aplicación de estrategias para gestionar la construcción de formas más eficientes.

Muchos de estos adelantos que vienen de la informática y las tecnologías de la información y la comunicación tienen algo en común, y son las prácticas y hábitos de trabajo. Para estos mundos, desarrollar algo implica trabajar a unas velocidades muy distintas y con prácticas muy sofisticadas comparadas con las del sector constructor, y prácticamente todo lo que desarrollan lleva sobrepuesta esa forma o lógica de trabajo e interacción; tal vez ello es lo que más está condicionando al profesional de la construcción, ya que cuando se trabaja en entornos de tecnología, esta misma hace que todo sea más rápido y se requiera “agilidad de trabajo”, o lo que en teoría de sistemas se conoce como mentalidad social o de crecimiento, la cual está definida por una serie de rasgos, conjunto de supuestos, prácticas y métodos que hace el trabajo colectivo mucho más ágil e innovador en el tiempo.

Mientras que en general nuestro modelo mental es prácticamente fijo y estereotipado a prácticas tradicionalistas, el de los desarrolladores es más abierto, dinámico e incremental, por lo que se nos dificulta el cambio tecnológico e insertarnos a esas condiciones de trabajo; sin embargo, algunas de esas prácticas ya se están incorporando a procesos de gestión de diseños y control de ejecución en obra, permitiendo fluir más fácil en el uso de los medios tecnológicos o cambiar los métodos de gestión. Enfoques como el agilismo que trae consigo metodologías como Scrum, Kanban, Cristal, Xp, entre otras, son alternativas para estudiar, entender y adaptar a nuestro *mindset*, de hecho, estos modelos hacen parte de los enfoques Lean y son objeto de exploración en el aula con los estudiantes para empezar a incorporar esas competencias asociadas al trabajo colaborativo y al replanteamiento de lo que hoy se hace en el campo laboral.

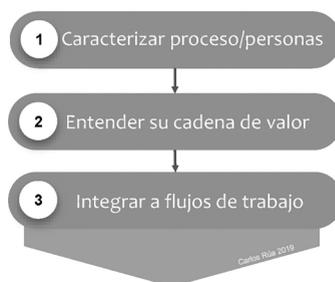
Al incorporar estos modelos, la condición de gestión se torna más a la interdependencia de procesos y al manejo de los recursos, y en este sentido toma mayor sentido la gestión de la cadena crítica, y desde allí se involucran otras metodologías que coexisten con los enfoques Lean como justo a tiempo, cinco eses (5's) y teoría de restricciones y Kaizen, esta última articuladora del cambio.

Ninguno de estos enfoques podrá trascender de forma adecuada si no se profundiza en algo mencionado anteriormente, y es la gestión de procesos;

tanto a nivel académico como en el ejercicio profesional debe ser un requisito para mantener la coherencia, definir mejoras prácticas y establecer mayor rigor en la gestión, aspecto que es inherente en la forma de pensar de aquellos que desarrollan tecnología y que nosotros también debemos redefinir y redescubrir. La figura 5 establece un esquema de trabajo que debe ser iterativo y debe realizarse cada vez que se desarrolla un proyecto, ya que en nuestro sector constantemente están cambiando los actores, lo que conlleva una revisión constante entre personas y procesos a fin de fortalecer los criterios de gestión sobre cómo cada actor realiza su trabajo, independiente si existe o no un sistema de gestión, ya que este *per se* no asegura la calidad de la gestión y mucho menos la calidad de los entregables. En función de ello, los programas, tanto de pregrado como de posgrado deben incorporar procesos de aprendizaje relacionados con modelos de iteración, donde se profundicen en mecanismos de representación y modelado como las matrices de adyacencia o estructuras de dependencias, esto con el objeto de aprender a desplegar diseños de los esquemas de trabajo, hacer simulaciones de flujos y con ello tener mayor claridad sobre la configuración de equipos de trabajo y llevar incluso estos modelos a sistemas BPM (Business Process Management), cuyo objeto es precisamente desarrollar una disciplina de gestión incremental y adaptativa.

ESQUEMA DE TRABAJO

Gestión integrada (administración de proyectos)



Gestión de la información

Figura 5. Variables para gestionar la información en el desarrollo de un proyecto.
Fuente: elaboración propia.

A través del clúster Hábitat sostenible, en 2019, este tipo de esquemas han sido implementados como pilotos para caracterizar las dinámicas de trabajo entre disciplinas en un proceso de diseño y cómo se entienden estos actores para repensar su manera de interacción, teniendo como premisa la construcción y flujo de la información para lograr capitalizar los medios digitales desde los que particularmente trabajan. En este escenario hemos encontrado, como factor común, una disparidad de criterios, y que este tipo de esquemas, no solo son necesarios, sino también que deben ser implementados desde una base metodológica que permita ser común para todos. La tarea de coordinación para este tipo de procesos de integración entre disciplinas es un reto enorme al cual debe prestársele mucha atención. El capital humano en un proyecto es fundamental si se quiere “entrar” a digitalizar la gestión de la información que se vincula desde los modelos de cada especialista, y cómo se maneja la misma para abordar la gestión de costos, la gestión de cronogramas de forma colaborativa y adaptativa. La incorporación de tecnología ofrece medios para colaborar; sin embargo, se requieren condiciones de cooperación, y reconocimiento uno a uno para lograr una verdadera transformación y desarrollo social. Al entrar en procesos de concurrencia en el manejo de la información es pertinente abordar contextualmente cuál es la inercia de trabajo que resuelve la necesidad de esta, es decir, cómo la articulación de los actores se ordena y autorregula como un sistema que itera y se adapta a través de interacciones diseñadas e incluso modeladas, sin que se caiga en la autorreferenciación, la descoordinación y los sesgos por falta de comunicación.

La siguiente figura apunta a esta condición y sirve como modelo representativo sobre la conceptualización que debe darse en los sistemas humanos que desarrollan un proyecto, de tal forma que se escale de una condición de dependencia (iteración pausada y subordinada), a una condición de interdependencia (iteración dinámica). En esencia, este abordaje representa lo que Stephen Covey definió como el continuo de madurez en 1989.

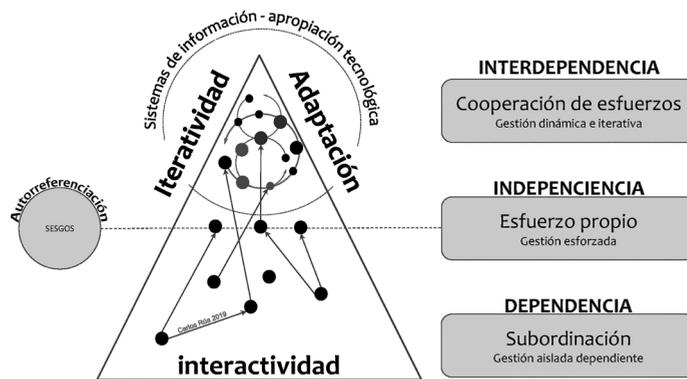


Figura 6. Modelo conceptual de la apropiación tecnológica a través de una gestión dinámica.
Fuente: elaboración propia.

Dado que en el país existe esa condición de bajos niveles de productividad, y que en gran medida ello depende de nuestros niveles de madurez en la gestión, es pertinente analizar y poner en discusión por qué aún no se alcanzan niveles optimizados que efectivamente cambien nuestros índices de desempeño, de acuerdo con lo que señala Eslava en la cita hecha en la introducción. La interacción en todas las escalas, tanto entre empresas, como gremios y gobiernos requiere compromisos, participación y aprovechamiento de las oportunidades que trae consigo la transformación digital. Proyectos del gobierno como fábricas de productividad son ventanas a ese desarrollo de capacidades de cooperación y dinámicas frente a la adopción de herramientas digitales, así como de las iniciativas que promueven los clústeres de las cámaras de comercio e Innova clúster de la agencia de emprendimiento e innovación del Gobierno nacional (Innpulsa).

Este escenario conlleva el replanteamiento de las formas de trabajo tanto entre personas, como entre empresas, clientes y entes de regulación. Pese a que se tengan sistemas de gestión, es necesario repensar cómo un proceso aparente puede facilitarnos el cumplimiento de objetivos y que no necesariamente al incorporársele tecnología lo pueda hacer mejor. Si este no se revisa, se adapta o se incrementa, lo más seguro es que esa tecnología magnifique una ineficiencia.

La primera regla de cualquier tecnología utilizada en los negocios es que la automatización aplicada a una operación eficiente magnificará la eficiencia. La segunda es que, si la automatización se aplica a una operación ineficiente, magnificará la ineficiencia.
Bill Gates

Justamente, esto es lo que a muchos les está pasando y el primer paso para ello es reconocerlo. En octubre de 2018 realizamos una misión a Santiago de Chile, donde logramos aclarar muchas de las dudas que teníamos sobre cuál es el *bottom line* para la digitalización en el sector constructor. Para sorpresa nuestra, no estaba en la tecnología y las herramientas digitales en sí, sino en los procesos de gestión. La correría estuvo diseñada para capturar, desde diversas miradas, que hace que se pueda definir una estrategia exitosa para un sector que, en términos globales, se ha considerado tradicionalista y con alto grado de aversión al cambio, ineficiente y poco innovador.

Durante dicha visita escuchamos activamente y de forma independiente a representantes de Corfo (Corporación de Fomento de la Producción-Gobierno de Chile), CDT (Corporación de Desarrollo Tecnológico) de la Cámara Chilena de la Construcción, Icafal S.A. (empresa de ingeniería y construcción), Pontificia Universidad Católica de Chile y Punto Lab (firma de consultoría y formación en BIM). Esta visión de 360° nos permitió contextualizar la estrategia chilena y a su vez estructurar criterios para interpretar qué acciones realizaríamos en el marco de los proyectos de difusión, socialización e implementación de pilotos para el clúster Hábitat Sostenible.

En Chile lo primero que hizo el Gobierno fue reconocer que sus procesos de contratación y gestión de la construcción, desde cada uno de los ministerios (obras públicas, vivienda e infraestructura), tenían serios problemas y que el costo del bajo rendimiento estaba allí en sus procesos. Esto obligó a la redefinición de procesos y al diseño de nuevos que permitieran alinear una estrategia de digitalización y marcar los criterios para trabajar bajo esos esquemas, situación que se extendió a lo académico y lo privado.

Cambiar y redefinir el concepto de qué es un proceso, y más aún desde lo académico, siempre será un desafío, ya que nuestros estudiantes deben

salir a su vida profesional con absoluta claridad sobre las implicaciones de trabajar por procesos en un escenario aún lleno de ambigüedades, improvisaciones y malas prácticas de gestión.

Desde hace aproximadamente una década, el entorno de la construcción se ha venido montando a una “ola” que interpreto como la *ola de los sistemas de integración*, basada en digitalización de procesos y tecnología, pero esta ola estuvo precedida por la *ola de los sistemas y enfoques Lean* y esta a su vez por la *ola de los sistemas de gestión*. Si bien hasta aquí no hay nada novedoso, lo que pretendo es sentar una posición crítica y abierta a la discusión, para explicar, desde esa postura, por qué se nos dificulta realmente hacer gestión en el sector de la construcción, dado que esta involucra esas tres olas.



Figura 7. Elementos habilitantes de la gestión la construcción.
Fuente: elaboración propia⁹

La figura plantea los tres escenarios principales que, en la línea de tiempo, han incidido sobre lo que fue, ha sido y será la gestión de la construcción y que han marcado los sistemas aplicables a ella. Tanto para el contexto productivo como para el contexto académico esta visión de conjunto pretende llamar la atención sobre lo que ha sucedido y cómo

⁹ Adaptación de conferencia “Gestión del cambio en el sector constructor, afrontar el desafío bajo un modelo metodológico en un contexto de oportunidades digitales”, Martes de la SAI (Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos), Rúa Machado, 2019.

repercute la primera ola sobre las demás, por qué es la más importante y por qué es a la que menos se le está prestando atención como tal. Cabe resaltar que ningún sistema de gestión, por bien estructurado que esté, no representa nada sin el dominio, uso y manejo por parte de los sistemas humanos, y estos a su vez son los que les dan sentido a los sistemas Lean y a los sistemas de integración representados por múltiples sistemas de información y comunicación que nos aportan los desarrollos de la tecnología.

El Escenario 1, “Primera ola”, corresponde al periodo comprendido desde principios de los años noventa hasta el 2000 aproximadamente. Este periodo estuvo marcado por un contexto social, económico y político bastante crítico para nuestro país; los efectos del narcotráfico, los retos de las instituciones públicas y el escenario político marcaron un proceso de transición y replanteamiento como país, y en ese sentido, programas como la apertura económica y la promulgación de la nueva Constitución Política para Colombia se convertían en una nueva expectativa de cambio.

Se empezó a hablar de globalización e internacionalización y con ello las apuestas de muchas empresas e instituciones, incluso de educación superior, se orientaban a retar su *statu quo* implementando nuevos modelos de gestión; buscando adaptarse, diferenciarse e insertarse en la ola de la competitividad y la calidad total (*Total Quality Management*). Este último concepto, producto de la reconocida cultura organizacional japonesa, determinó para muchos una nueva filosofía de trabajo y un argumento para hacer un tránsito hacia la gestión por procesos.

Los sistemas de gestión, en primera instancia orientados al aseguramiento de la calidad, hicieron que las empresas se centraran en la documentación de los procesos, generando formatos, procedimientos, instructivos y demás como recursos de la gestión, pero aquí es donde puede estar uno de los factores de nuestra baja cultura en procesos. Esos artefactos, representados con información sobre el qué, muchas veces se quedaron estáticos, generando una inercia muerta, al punto que numerosas veces no se dinamiza o activa en el campo por quienes hacen gestión, y en el tiempo pierden su valor como activos de conocimiento.

En algunos casos por falta de seguimiento o simplemente porque al lograr un sello de calidad se consideraba que la tarea ya estaba hecha, y que solo bastaba con mantener una documentación acorde a las condiciones de control o auditoría del ente certificador, perdiendo la oportunidad de capitalizar ese trabajo, a través de estrategias metodológicas de desarrollo incremental como el DMAIC¹⁰, que pocas veces son usadas por las empresas de forma constante (mejora continua).

Al no tener esa condición de cambio y actualización permanente, seguramente se limitó el desarrollo de una cultura fuerte en procesos, y además el efecto “silo” contribuyó a hacer que las empresas no articularan estrategias de desarrollo colectivo entre diferentes áreas, creando así un rezago de la mejora continua. Considero que, si esto no fue así, tal vez la necesidad de cambio a lo digital se hubiese dado en nuestro país de forma más anticipada, tal vez la baja cultura de procesos tiene mucho que ver con el compromiso y el posicionamiento frente al cambio.

Según Lewis (1996, p. 33, 40, 67), los aspectos del comportamiento en las diferentes culturas alrededor del mundo se categorizan en tres dimensiones o grupos de comportamiento; una de sus afirmaciones establece que el éxito en la gestión tiene mucho que ver con la capacidad de ser culturalmente sensibles, aspecto que refuerza el valor de los sistemas humanos y su relevancia en cualquier ámbito; Lewis indica en su investigación que los latinos hacemos parte del grupo de personas “multiactivas”, las cuales tienden a hacer muchas cosas al tiempo y en las cuales predominan patrones y rasgos en común, como: la emoción, la retórica, el drama, la elocuencia, la persuasión, la importancia de la religión, la primacía de los lazos familiares, sociedades de baja confianza, impuntualidad, ética laboral variable, planificación inadecuada, aversión al oficio, sociabilidad, nepotismo, excitabilidad, malestar con la disciplina estricta.

Estas características contrastan con el grupo de personas que son “lineales activos”: planificadores altamente organizados y orientados a tareas, que completan cadenas de acción haciendo una cosa a la vez,

¹⁰ Herramienta metodológica enfocada en la mejora incremental de procesos existentes.

preferiblemente de acuerdo con una agenda lineal. Estos comprenden el mundo de habla inglesa: Norteamérica, Gran Bretaña, Australia, Nueva Zelanda, y el norte de Europa, incluidos Escandinavia y países germánicos. Puede decirse que este grupo es el inventor de los estándares y de la gestión por procesos.

El tercer grupo son los asiáticos, excepto el subcontinente indio, que Lewis lo considera híbrido. A estos los define como “reactivos” y se caracterizan por ser buenos oyentes, que rara vez inician una acción o discusión, prefieren escuchar primero y establecer la posición del otro, luego reaccionar y formar su propia opinión, aspecto que les confiere una gran capacidad para ser socialmente sensibles y comunicarse cara a cara, además de tener como rasgo distintivo su capacidad armónica y su orientación a actuar con principios muy sólidos.

Tal vez esa característica multiactiva de los latinos pueda ser una de las barreras para trabajar con mayor fluidez en enfoques fundados en procesos y el paso a paso, pero también pueda ser un elemento diferenciador para los trabajos concurrentes y dinámicos, donde las iteraciones y ciclos de la gestión exijan gran capacidad de flexibilización y agilidad mayor. En esto hay todo un campo por explorar que promete muchas oportunidades si se mira como seres humanos; así, nos puede dar un posicionamiento ante los avances tecnológicos y lo que implica actuar con ello.

Si bien estos aspectos son objeto de análisis y requieren mayor profundización con relación a su interpretación o uso, es claro que el factor cultural y comportamental de los sistemas humanos tiene alto impacto en la calidad de la gestión, independiente de la temática o área disciplinar; este tipo de enfoques permite un acercamiento a ello con una mirada más abierta a las oportunidades que ofrecen estudios e investigaciones, asociadas a las ciencias sociales y administrativas. Nuestro sector requiere mucho de ello para mejorar sustancialmente las acciones profesionales, y que estas no estén sesgadas a un solo saber, es decir, buscar un equilibrio entre el saber técnico, el saber administrativo y el saber social que pueden derivar en una mejor respuesta sobre lo que denominamos gestión. La práctica debe ser entendida como todo acto

cíclico establecido por un grupo humano en el orden de la técnica, la religión, la economía o la política (Podestá y Jurado, 2005), según esto, podríamos decir que, para hacer gestión, deben confluír muchos aspectos, y el técnico es solo un componente y aunque es la base del saber disciplinar, no es su única fuente para hacer gestión.

Entender lo que hacemos y la forma en que logramos los objetivos, debe ser una construcción colectiva, máxime cuando en nuestro mundo de la construcción orbitan múltiples especialidades y formas de pensar. Lo esencial y fundamental es poner atención a diferentes miradas y cómo ello realmente nos pueda a ayudar a cambiar, adaptarnos y amalgamarnos como grupos sociales, coordinados por un lenguaje común y con criterios colectivos frente a las condiciones de transformación que la era digital nos pone en frente; ello implica mantener la puerta abierta para redescubrir posibilidades de renovación y definir mejores prácticas de gestión, fortalecernos en la disciplina y el rigor de seguir procesos.

*Si Usted no puede describir lo que está haciendo
como un proceso, usted no sabe lo que está haciendo.*

Edward Deming

REFERENCIAS

- Alarcón, L. y Mardones, D. A. (1998). Improving the design-construction interface. En *6th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Guarujá, Brasil.
- Batram A. (2001). *Navegar por la complejidad, Guía básica sobre la teoría de la complejidad en la empresa y la Gestión*. Barcelona: Granica S.A.
- Building and Construction Authority. (2013). *Singapore BIM Guide-V2.0*. Singapur.
- Camacol. (2017). Una apuesta en construcción: mayor productividad, menores riesgos. Memorias. Congreso Colombiano de la Construcción.
- Construction Industry Research and Information Association [Ciria]. (1983). *Buildability: An Assessment*. Londres: Ciria.
- Construction Industry Institute [CII]. (1986). *Constructability: A Primer*. Austin: Construction Industry Institute, University of Texas.
- Consejo Privado de Competitividad. (2018). Informe Nacional de Competitividad.
- Eslava, M. (2019). Capital humano. Colsubsidio. Recuperado de <https://www.xpensible.com/productividad/las-razones-por-las-que-colombia-se-raja-en-productividad-laboral/>
- Garbanzo-Vargas, G. (2015). Desarrollo organizacional y los procesos de cambio en las instituciones educativas, un reto de la gestión de la educación. *Revista Educación*, 40(01), 67-87.
- Harvard University Construction Management Council. (2010). *BIM Uses Guide*. Cambridge, MA.
- Koestler A. (1967). *The Ghost in the Machine*. Reino Unido: Hutchinson.
- Kreider, R. (2013). *An Ontology of the Uses of Building Information Modeling* (tesis doctoral, Pennsylvania State University, State College, PA). Recuperado de https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/7680
- Kreider, R. G. y Messner, J. I. (2013). The uses of BIM: classifying and selecting BIM uses. Penn State, State College, PA.
- Lewis, Richard D. (1996). *When Cultures Collide, Leading Across Cultures*. Londres: Nicholas Brealey Publishing
- Manucci, M. (2010). *Contingencias, 5 desafíos de cambio para una nueva década*. Bogotá: Norma.

- McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability: the kappa statistic. *Biochemia Medica*, 22(3), 276-282.
- McKinsey Global Institute (2017). Reinventing construction: a route to higher productivity. Recuperado de <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution>
- Messner, J.; Anumba, C.; Dubler, C.; Goodman, S.; Kasprzak, C.; Kreider, R.; Leicht, R.; Saluja, C. y Zikic, N. (2019, agosto). BIM Project Execution Planning Guide, version 2.2. Computer Integrated Construction Research Program, The Pennsylvania State University, University Park, USA. Recuperado de <http://bim.psu.edu>.
- Morin, E. (2011). *Introducción al pensamiento complejo* (10.ª ed.). Barcelona: Gedisa.
- Mossman A. (2020). *Construction is broken*. Lean Construction blog. Recuperado de <https://leanconstructionblog.com/construction-is-broken.html>
- Podestá, P.; Jurado, J. C. (enero-junio, 2005). Fundamentos del saber administrativo. *Revista del Centro de Investigación de la Universidad La Salle*, 6(23), 27-42.
- Project Management Institute (PMI). (2007). *PMBOK: A Guide to the Project Management Body of Knowledge*. Newtown Square: PMI.
- Project Management Institute. (2016). *Construction Extension to the PMBOK Guide*. Newtown Square: PMI.
- Sena y Camacol. (2015). Proyecto de investigación del sector de la construcción de edificaciones en Colombia. Bogotá: Cámara Colombiana de la Construcción.
- Succar, B.; Sher, W.; Williams, A. (2012). Measuring BIM performance: five metrics. *Architectural Engineering and Design Management*, 8(2), 120-142.
- Succar, B. (2016). 211 in Model Uses List. Recuperado de <https://bimexcellence.org/files/211in-Model-Uses-Table.pdf>.
- The American Institute of Architects (AIA). (2007). *Integrated Project Delivery: A Guide*. Washington, D.C.
- Thorndike, E. L. (1920). A constant error in psychological ratings. *Journal of Applied Psychology*, 4(1), 25-29.
- World Economic Forum. (2016). Shaping the future of construction, a breakthrough in mindset and technology. Industry Agenda.
- World Economic Forum. (2018). An action plan to accelerate Building Information Modeling (BIM) adoption.

Capítulo 6

Iluminación artificial en Colombia y la participación de la Universidad Nacional de Colombia

Juan Enrique Torres Madrigal

Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia

ANTECEDENTES

Para el final de los años noventa y comienzo del nuevo milenio, el mundo vive más intensamente el despegue de la globalización de mercados. A nivel internacional, se plantea la integración económica de países, la cual se articula a través de los tratados de libre comercio (TLC). Y se aprecia el desarrollo exponencial de la red de infraestructura que soporta la Internet.

La tecnología en la iluminación crece con nuevas innovaciones e implementaciones como el diodo emisor de luz (LED) azul de alto brillo, desarrollado por el profesor japonés Shuji Nakamura en 1995 para la firma Nichia, dando lugar en el nuevo milenio a las primeras aplicaciones de luz blanca con mezcla de colores rojo-verde-azul y luz blanca con LED azul y fósforos para la iluminación comercial. En 2006 Nakamura gana el premio Millenium Technology Prize, y a partir de este momento comienzan las primeras fases de comercialización de esta tecnología.

En el 2014 Nakamura gana el Premio Nobel de Física junto a Isamu Akasaki y Hiroshi Amano por “The invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright an energy-saving White light sources” (The Nobel Prize, 2021).



Figura 1. Iluminación patrimonial.

Fuente: Encuentro Internacional de Diseño de Iluminación, EIDIL 2018, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

En Colombia, a principios del milenio se propone una fusión técnico-legal para el cumplimiento de los TLC pactados con otros países, dando lugar a reglamentos de obligatorio cumplimiento con el fin de cumplir con los compromisos pactados. En el 2004 se adopta el primer reglamento técnico de instalaciones eléctricas, Retie (Ministerio de Minas y Energía, 2021) que entra en vigor en el 2005; en el 2009 se adopta el primer reglamento de iluminación y alumbrado público, Retilap (2021a) que entra en vigor en el 2010.

EVOLUCIÓN

Para principios del nuevo milenio, el panorama de la iluminación estaba representado por varias tecnologías según su uso y su eficiencia. Entre estas tecnologías tenemos la iluminación incandescente, halógena a nivel residencial y comercial, que estaba siendo reemplazada por tecnología de luminarias fluorescentes de mayor eficiencia energética. A nivel industrial, luminarias de descarga de gas como haluros metálicos, sodio y mercurio.

La normatividad en Colombia en su momento era escasa, con excepción de algunos valores de cumplimiento plasmados en tablas en el código eléctrico nacional, en la norma NTC 2050 y en la norma

NTC 900 de Alumbrado Público. Por lo cual, operadores de red y la industria pesada optan por utilizar referentes de normas y reglamentos internacionales en muchas ocasiones.

El mercado colombiano para el principio del milenio se compone de fabricantes nacionales, junto con maquiladores de algunas marcas internacionales y marcas extranjeras que habían predominado en la iluminación a nivel mundial. Para el sector de la construcción, la iluminación era más un insumo de bombillería y tubos fluorescentes que de luminarias. Sin embargo, en la parte arquitectónica se podían encontrar luminarias artesanales, o luminarias hechas con cristalerías y otros materiales decorativos importadas con fuentes halógenas en su mayoría.



Figura 2. La Iluminación como identidad cultural.
Fuente: Encuentro Internacional de Diseño de Iluminación, EIDIL 2018,
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

A nivel de la Universidad Nacional de Colombia, en el año 2004 se crea el programa de Especialización en Iluminación Pública y Privada, el cual sigue vigente en la actualidad, orientado a un perfil técnico de ingeniería para el desarrollo de proyectos lumínicos (Universidad Nacional de Colombia, 2021).

Colombia no ha sido ajeno al cambio debido al desarrollo de la tecnología LED; en el año 2008 se comienza a notar la penetración del LED a nivel

comercial. Sin embargo, la ventaja que tenía sobre las bombillas compactas y tubos fluorescentes la tecnología importada en los LED de primeras generaciones era su mayor duración, pero con regulares distribuciones fotométricas y no se superaba la eficiencia de la tecnología fluorescente.

En cuanto al tema reglamentario y normativo, solo hasta el 2010 entra en vigor el Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público (Retilap), que está desarrollado y orientado a atender los requerimientos de fuentes tradicionales, diferentes al LED. Es este un reglamento basado en la normatividad española y europea de iluminación.

En el 2011 fue fundada Litro de Luz, una organización no gubernamental (ONG) que trabaja de la mano con A Liter Of Light (Filipinas), para aportar soluciones a las comunidades vulnerables para iluminar sus hogares y espacios públicos utilizando energía solar de bajo costo, botellas recicladas y cloruro de polivinilo (PVC), esto ligado a una intervención social que garantiza la apropiación de la tecnología (Liter of Light, 2021; Lévano, 2013).

En la ciudad de Medellín se contó con la primera cohorte del diplomado de Diseño de Iluminación, propuesto por la Colegiatura Colombiana desde su carrera de Espacios y Escenarios, teniendo como director al arquitecto Juan Domínguez. El diplomado está dirigido a diseñadores, arquitectos, ingenieros, así como técnicos del campo de la construcción y servicios de iluminación. Entre los catedráticos que participaron en el diplomado se encuentran Jorge Jaramillo, Carlos Rúa, de Perú, Verónica Sáenz y el mexicano Jesús Orozco, entre otros (Iluminet, 2011).

En el 2012 Medellín se hace miembro de la Comunidad Internacional de Alumbrado Urbano (Luci, 2021), organismo que propende por integrar las políticas de iluminación al desarrollo de ciudades sostenibles para optimizar el consumo energético y reducir el impacto medioambiental.

La ciudad delega la gestión del alumbrado público a las Empresas Públicas de Medellín siguiendo los lineamientos de la ciudad, cuya estrategia de iluminación se basa en el plan maestro de iluminación. Actualmente se está desarrollando de acuerdo con el plan urbano de Medellín (Plan de Ordenamiento Territorial, POT).



Figura 3. Iluminación arquitectónica del patrimonio.
Fuente: Encuentro Internacional de Diseño de Iluminación, EIDIL 2018,
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

En 2012 también se celebró el XI Congreso Iberoamericano de Iluminación (Luxamérica); la Asociación Colombiana de Luminotecnia y la Universidad Nacional de Colombia promocionaron el evento, que se realiza cada dos años, y que por primera vez se realizaba en Colombia. Este evento convoca la participación de expertos y especialistas en iluminación de diferentes países iberoamericanos. Luxamérica constituye un espacio para la promoción de intercambio e integración entre quienes se dedican a la investigación científica, la ingeniería, y quienes provienen del mundo de la arquitectura y el diseño de iluminación, así como también fabricantes, importadores de productos relacionados con la iluminación. Este evento se realiza en Cartagena de Indias, Colombia (Iluminet, 2012).

En el 2012 se certifican, además, laboratorios de iluminación ante el Organismo de Certificación en Colombia (Onac), como el laboratorio QTEST, y el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cidet). En este mismo año, la ciudad de Medellín contó con la segunda cohorte del diplomado Diseño de Iluminación propuesto por la Colegiatura Colombiana desde su carrera de Espacios y Escenarios, dirigido por el arquitecto Juan Domínguez y con la participación de los docentes Áder García, Aníbal Cardona, Augusto Ramírez, Camila Posada, Daniee

la Cano, David Vanegas, Diego Espinel, Diego Valencia, Jenaro Briñón Vélez, Horacio Valencia, Jorge Jaramillo, Juan Alberto Londoño, Juan Domínguez, Juan Torres, Lazlo Jurko, Miguel Uribe, Vladimir Uquillas y el mexicano Elías Cisneros (Iluminet, 2012a). Adicionalmente se realiza el *workshop* práctico para aplicar conocimientos y experiencias profesionales en el área de iluminación, mediante la realización de un proyecto de práctica en las instalaciones de la Colegiatura Colombiana. Fue un ejercicio de diseño de iluminación práctico-conceptual, en el que se implementaron los conceptos y directrices teóricas y técnicas para un buen desarrollo de proyecto. La arquitectura del lugar, sus formas y volúmenes, materiales y colores, se convirtieron en un excelente espacio de interacción entre conocimiento, concepto y práctica.



Figura 4. Iluminación en el exterior, la noche como una oportunidad.

Fuente: Encuentro Internacional de Diseño de Iluminación, EIDIL 2018, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

En octubre del 2013 un grupo de trece diseñadores de iluminación, independientes: Claudia Fernanda Bermúdez, María Adelaida Velásquez, María Antonia Villegas, Juan Domínguez, Ivonne Cifuentes, Julia Erlhófer, Carolina Parra, Tatiana Montoya, Liliana Mouthon, Carmenza Henao, Jorge Andrés Gaitán, Alfredo García y Diana Mazuera, fundan la Asociación de Diseñadores de Iluminación en Colombia (ASDLUZ),

una asociación sin ánimo de lucro que promocionó el diseño de iluminación profesional en Colombia, a la cual se le unieron arquitectos, paisajistas, artistas en su mayoría y algunos ingenieros al igual que socios comerciales de fabricantes, comercializadores e importadores de iluminación, dando una mirada a la iluminación a través del sentir, generando ideas y experiencias sin dejar de lado la rigurosidad técnica. Durante varios años (2013 a 2017), la asociación estuvo muy activa, generando gran visibilidad y posicionando el diseño de iluminación en Colombia a nivel internacional, a través de eventos como la Feria Internacional del Sector Eléctrico (Fise, 2013), Hablemos de Luz y el Tercer Encuentro Iberoamericano de Diseñadores de Iluminación (EILD, 2014), por dar algunos ejemplos; adicionalmente se dictaron talleres y charlas en universidades, se hicieron publicaciones en revistas como *Illuminet* (2016), en los que se presentaron proyectos de diseño de sus miembros al público en general.

Ya para el 2014 hay un mercado más consolidado donde la tecnología LED cuenta con dos segmentos de productos; unos de baja calidad y bajo precio, importados de Asia. Aclaro, el problema no es que los asiáticos no tengan buena calidad, el problema es de los importadores que escogen la calidad más económica y rentable en los mercados asiáticos para posicionarlos en Colombia y tener grandes márgenes de utilidad. El segundo segmento son los productos de alta especificación y calidad, importados de Estados Unidos o Europa. Normalmente utilizados por empresas corporativas o industriales para proyectos de mediana o gran envergadura y una pequeña producción nacional con unos pocos fabricantes, algunos con muy buena calidad, y otros, en proceso de aprendizaje.

El comienzo de la masificación del LED se hace notoria en ese momento, cuando se encuentran luminarias LED y bombillas que igualan la eficiencia de las fuentes convencionales, y que cuentan con una mejor distribución fotométrica y una vida útil más alta.

En el 2014 se celebra en la ciudad de Medellín el Tercer Encuentro Iberoamericano de Diseñadores de Iluminación (EILD), gracias a la Asociación de Diseñadores de Iluminación de Colombia (ASDLUZ); dirigida en su momento por el arquitecto Juan Domínguez (diseñador de iluminación).



Figura 5. Iluminación nocturna paisajística.

Fuente: Encuentro Internacional de Diseño de Iluminación, EIDIL 2018, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.

En el encuentro se reconoce a la ciudad de Medellín por su larga tradición en la elaboración del alumbrado navideño. En el libro *Medellín Iluminada*, del profesor Miguel David Rojas López, se da a conocer el origen, desarrollo e impacto de los alumbrados navideños año tras año (entre 1999 y 2009), su evolución técnica, social y financiera (Rojas, 2011, p. 134).

El evento tuvo el respaldo de la Alcaldía de la ciudad de Medellín, el clúster de energía, el operador de red, Empresas Públicas de Medellín, entre otros (EILD, 2014). Fue un evento de gran trascendencia en el que se mostró en la ciudad la importancia del diseño lumínico, donde confluyen la arquitectura y la ingeniería. Fue patrocinado por varias firmas nacionales e internacionales de gran poder de convocatoria, y lograron reunir en su *workshop* más de cuarenta y un profesionales en el diseño de iluminación que desarrollaron el tema de planeamiento de luz urbana. Estuvo liderado por los diseñadores de iluminación Roger Narboni, de nacionalidad francesa, en compañía de Pascal Chautard, Fanny Guérard y el arquitecto colombiano Davis Venegas, “con el objetivo de crear una metodología para el diseño del paisaje nocturno del área metropolitana de la ciudad”. El tema, “Estación de luz”, dirigido y coordinado por Ignacio Valero, diseñador de iluminación español, y Tatiana Montoya, dise-

ñadora colombiana de iluminación, junto con los profesionales Mónica Lobo (Brasil), Rafael Leão (Brasil), Claudia Paz (Perú), Ana Bustamante (Colombia), Jorge Jaramillo (Colombia) y Víctor Palacio (México), quienes capacitaron a un grupo de cuarenta personas, entre ellas profesionales y estudiantes de Colombia, Perú, México, Ecuador, Argentina y Brasil (EILD, 2014). Se puede decir que fue un hito importante en la evolución local de la iluminación. Muchos diseñadores y fabricantes se impregnaron de conocimientos para la evolución de la iluminación, a nivel local y nacional.

A escala mundial, la Organización de Estados Americanos declaró el 2015 como Año Internacional de la Luz; y “su objetivo es destacar la importancia de las tecnologías basadas en la luz que pueden ofrecer soluciones a problemas mundiales sobre energía, educación, agricultura y salud” (*El País*, 2013), y si bien a nivel local no tuvo tanta trascendencia, a nivel mundial fue el posicionamiento de la nueva tecnología LED como el reemplazo de la mayoría de las tecnologías anteriores, dado que la fabricación de LED es más simple. Ingresaron muchos actores nuevos a disputarse el mercado aumentando la competitividad en el sector y desarrollando un mercado de reposición de tres a cinco años dada la evolución de la tecnología; anteriormente esta reposición se realizaba cada diez años.

En el 2018 nace la Fiec, Feria de Iluminación + Electricidad, una exhibición comercial colombiana, de carácter internacional, enfocada exclusivamente en los sectores de la iluminación y tecnología LED, tanto en interiores como en exteriores y de carácter público y privado (Fiec, 2020).

Para el 2018, la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, realiza el Encuentro Internacional de Diseño de Iluminación, EIDIL.

Proponiendo la luz, a través de todas sus expresiones, artísticas, filosóficas o funcionales, lleva el poder de resignificar la identidad de una nación. La iluminación tradicionalmente ha sido tratada desde un aspecto normativo y reglamentario. Es un hecho, que el concepto de iluminación obliga a considerar además de lo técnico, aspectos socioculturales y ambientales para lograr así, la transversalidad y la integralidad que requiere un proyecto de iluminación, protegiendo el patrimonio de Colombia, su cultura y su biodiversidad. (Iluminet, 2018)



Figura 6. La sombra como reflejo de la naturaleza.

Fuente: Encuentro Internacional de Diseño de Iluminación, EIDIL 2018, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Este evento fue liderado por las facultades de Arquitectura y Minas, conjuntamente, con el apoyo de empresas de iluminación y eléctricas, y el Instituto Colombiano de Crédito Educativo y Estudios Técnicos en el Exterior (Icetex). El evento se realizó con un día de charlas acerca de la iluminación y su relación e influencia en la arquitectura y la ingeniería desde varios puntos de vista, con la participación de los siguientes expertos en diseño de iluminación: arquitecto Jorge Gaitán (Colombia), líder del *workshop*, y los siguientes mentores internacionales: el ingeniero Alex Ramírez (México), el paisajista Raphael Girouard (Francia), la arquitecta Elí Sirlin (Argentina) y el diseñador de iluminación arquitectónica Ignacio Valero (España), apoyados por diseñadores de iluminación colombianos.

En el 2019 se ejecuta el proyecto de extensión solidaria “Incluminación”, propuesto por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, desde la Facultad de Arquitectura, Escuela de Construcción, con el fin de mitigar las vulnerabilidades de la comunidad Altos de Oriente II. Allí se desarrolló un proyecto de apropiación tecnológica a través de la cocreación de luminarias solares para el interior de las casas, usando como excusa la iluminación y la energía solar para generar tejido social alrededor de esta comunidad (Facultad de Arquitectura UNAL, 2018).

Para el 2020 se celebraron dos eventos importantes en Colombia, Luxamérica 2020, con el apoyo de la Universidad Nacional de Colombia (2021a), y la Feria de Iluminación y Electricidad Colombia (Fiec) 2020.

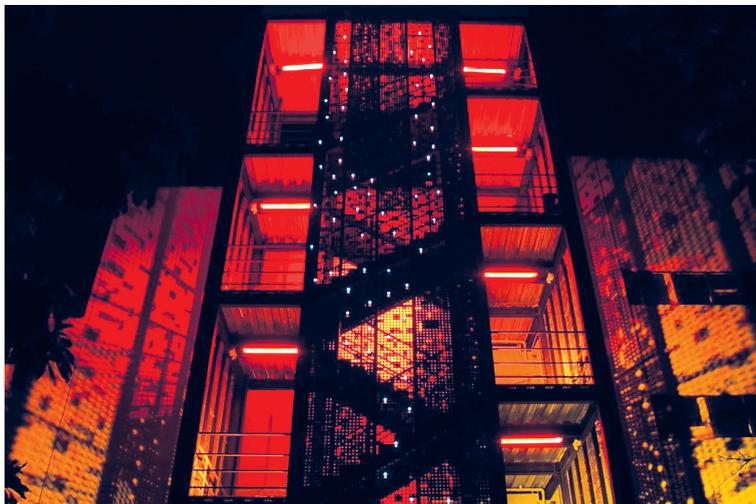


Figura 7. Fachada nocturna.

Fuente: Encuentro Internacional de Diseño de Iluminación, EIDIL 2018, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

INFLUENCIA DE LA ILUMINACIÓN EN LA ARQUITECTURA Y LA CONSTRUCCIÓN. ILUMINACIÓN Y SALUD

El manejo y dominio de la luz permite que el hombre deje de ser un sujeto diurno y también se desempeñe como un ser nocturno. Es importante resaltar que nuestra biología está diseñada para ser diurnos y el rendimiento físico y mental están determinados por el ciclo día noche, donde la luz natural influencia y en parte regula funciones corporales afectando nuestra salud y bienestar. Este efecto está directamente relacionado con la liberación de melatonina que ayuda a regular nuestro ciclo de sueño y vigilia. Junto con el cortisol, llamada la hormona del estrés, y la serotonina, llamada la mensajera motivacional, son hormonas del cuerpo directamente relacionadas con el reloj biológico interno, que son afectadas por la iluminación natural y artificial.

La iluminación artificial es biológicamente efectiva para ordenar los ciclos y ritmos humanos, y estabilizarlos tanto en el día como en la noche, sincronizándolos con el ambiente que le rodea. El impacto que tiene la luz en una obra de construcción y en el diseño arquitectónico en algunas ocasiones se subestima, afectando la salud y el bienestar de los ocupantes en edificios residenciales, comerciales, hospitalarios e industriales. Adicionalmente, la luz artificial en las edificaciones afecta tanto el valor estético de la obra como su eficiencia energética dependiendo de su diseño.

En el sector hospitalario, por ejemplo, ya encontramos firmas de iluminación que ofrecen productos para mejorar la recuperación de los pacientes, ayudando a coordinar el ciclo circadiano de las personas, mejorando la calidad de sueño y el estado de ánimo de los pacientes (Significar, 2021; Philips, 2021).

Los sistemas LED con módulos de chip-on-board (COB) biodinámicos son capaces de emitir un gran paquete de lúmenes de luz, y actualmente se están utilizando a modo de prueba en diversos hospitales y universidades en los que se apoya activamente el biorritmo de pacientes y estudiantes, proporcionando un espectro de luz dinámicamente ajustable que afecta de forma específica al organismo humano.

La iluminación biodinámica permite trabajar temperaturas de color ajustable que faciliten la supresión de melatonina, sin influir en la liberación de esta hormona con temperaturas de color ajustables.

Entre los factores clave para la iluminación biodinámica tenemos: la composición espectral incluyendo longitudes de onda con un efecto dominante, la duración de iluminación e intensidad, y la situación de iluminación (luz directa o indirecta). Las áreas de aplicación de este tipo de iluminación las podemos encontrar en casas y centros residenciales de atención de retiro para personas de la tercera edad, hogares privados, hoteles, jardines, escuelas, universidades, oficinas y centros de trabajos industriales (Highlights, 2021).

LA ILUMINACIÓN COMO UN FACTOR EN LA ARQUITECTURA EMOCIONAL

La arquitectura es más que una construcción de espacios lógicos y funcionales. La arquitectura es una obra de arte. A través de ella, nosotros como personas, habitamos los espacios para poder apreciar y sentir distintas emociones al estar en nuevos ambientes. Factores como el color, la iluminación y el uso del agua establecen características especiales en los ambientes, que agudizan ciertos sentidos en el ser humano. (Villanueva-Meyer, 2010)

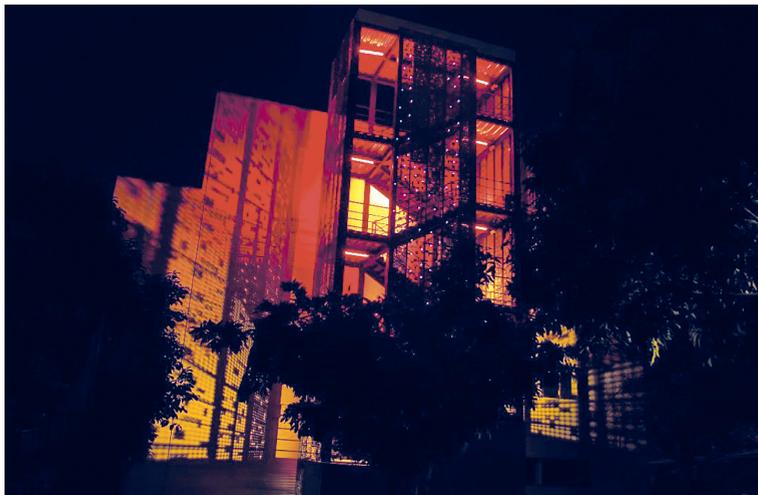


Figura 8. Fachada nocturna.

Fuente: Encuentro Internacional de Diseño de Iluminación, EIDIL 2018, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Es de vital importancia el uso de la luz en la arquitectura, no solo desde el punto de vista funcional, sino también desde el punto de vista emocional. Este concepto trasciende como arquitectura emocional, desde el “Manifiesto de la arquitectura emocional”, publicado por Matthias Goeritz en 1953 ante la apertura del Museo Experimental El Eco, en el entonces Distrito Federal en México. El arquitecto antes mencionado propone una exaltación de la emoción en su diseño arquitectónico (Goeritz, 2015). En la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, se trabajó en ese sentido en el 2018. La Gliptoteca, *Tótem mítico de las selvas*, estrena

iluminación resaltando las obras del maestro Pedro Nel Gómez. A través de un concurso de iluminación interactiva en entornos urbanos, que realizó el Departamento de Eléctrica y Automática de la Facultad de Minas en 2017, bajo la dirección de la profesora Mónica Vallejo, y liderado por Andrés Giraldo Maya, estudiante de Ingeniería Eléctrica, y Duvan Stivens Arias Sánchez, ingeniero de Control de la Sede Medellín. La materialización del proyecto fue posible gracias al apoyo de la Vicerrectoría de la Sede Medellín y la Dirección de Ordenamiento y Desarrollo Físico. A través del control de la iluminación se logró generar nuevas emociones en este espacio de la Sede (Universidad Nacional de Colombia, 2021b).



Figura 9. La Gliptoteca, *Tótem mítico de las selvas*.

Fuente: <https://medellin.unal.edu.co/noticias/1503-la-gliptoteca-totem-mitico-de-las-selvas-estrena-iluminacion.htm>

EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICACIONES Y EL APORTE DE LA ILUMINACIÓN

“La iluminación, según estimaciones de la International Energy Agency (IEA), representa casi el 20% del consumo mundial de energía eléctrica” (Saavedra, Rey y Luyo, 2017), y su aporte a la reducción y eficiencia energética es interesante. En el caso de la Universidad Nacional de

Colombia, Sede Medellín, el consumo energético debido a la iluminación es casi el 50% del consumo de la Sede, según datos tomados del sistema de gestión interno de medición y los diferentes proyectos que se han realizado en los últimos años. En 2016 se inició la caracterización de las fuentes luminosas de la Sede por parte de la Oficina de Infraestructura y la Oficina de Gestión Ambiental, implementando el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía (Proure) (Oficina de Gestión Ambiental, 2016). En 2017 se empezaron a utilizar fuentes LED de menor consumo y mayor vida útil en cada proyecto nuevo de infraestructura que en la Sede se estuviera ejecutando. Es relevante anotar que en los senderos peatonales y en el parqueadero de motos se cambiaron las luminarias de sodio de 70 a 125 vatios a 12 metros de altura por luminarias a 3 metros con tecnología LED de 10 a 20 vatios, con lo que no solo se contribuyó al bajo consumo energético, sino que se mitigó el impacto ambiental que tiene la iluminación nocturna en la universidad, permitiendo que las aves migratorias pernocten en las copas de los árboles del campus sin ser afectadas (Oficina de Gestión Ambiental, 2016, p. 52).

En el 2019 se ofreció presencialmente, y en el 2020 virtualmente, por parte del Centro de Educación Continua y Permanente de la Sede Medellín, un diplomado para arquitectos, constructores e ingenieros acerca de la normatividad de instalaciones para edificaciones. Se dictaron cuarenta horas del Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (Retie) (Ministerio de Minas y Energía, 2021), cuarenta horas del Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público (Retilap) (Ministerio de Minas y Energía, 2021a) y cuarenta horas del Reglamento interno de telecomunicaciones (Ritel) (Comisión de Regulación de Comunicaciones, 2021), con el fin de responder a la necesidad de actualización del medio en los reglamentos vigentes.

LA ILUMINACIÓN Y LA AGRICULTURA URBANA

Las ciudades y poblaciones en crecimiento son uno de los grandes desafíos del futuro. La importancia de la Agricultura Urbana para el desarrollo urbano sostenible está en aumento. A medida que crece el reconocimiento, más personas se están involucrando en este tema. En

años recientes, muchos boletines informativos y revistas han dedicado ediciones a la Agricultura Urbana, incluyendo *Gate*, *la Era Urbana*, *African Urban Quarterly*, y el Boletín *Leisa*, y se han realizado muchos talleres y conferencias sobre este tema. (Ruaf, 2001)

La influencia de la iluminación sobre este tipo de agricultura es de gran importancia debido a que con la tecnología LED se les suministra a las plantas el espectro de onda de la luz que realmente necesitan. Esta tecnología permite discriminar las longitudes de onda haciendo más eficiente la producción de cultivos de diversas especies.

RETOS

Uno de los retos es la eficiencia energética y el aporte de la iluminación al campus sostenible al interior de la universidad, y se debe continuar con el recambio de tecnología por LED de quinta o sexta generación, para participar en la construcción del campus sostenible y estar alineados con el Consejo Nacional de Política Económica y Social - Política Nacional de Edificaciones Sostenibles, Conpes 3919 (2018, p. 98) y con los objetivos de desarrollo sostenible, objetivos 4 y 11, “Educación de calidad” y “Ciudades y comunidades sostenibles” (UNDP, 2021, 2021a), firmado en París por el Gobierno nacional en el año 2015.

Otro desafío es lograr que los estudiantes de arquitectura y construcción dominen el uso y aplicación de las fuentes lumínicas y se convierta en un valor agregado en su vida profesional.

A nivel de posgrado, el reto es incorporar, dentro de los planes de estudios, materias o cursos que impartan conocimientos que ayuden a preparar a los estudiantes para que tengan la capacidad de desarrollar planes maestros de iluminación para los municipios, que son un factor clave en el desarrollo de los mismos. Los equipos de diseño de estos planes deben tener la capacidad de soportar los planes e integrarlos al desarrollo de cada municipio entendiendo que son multidisciplinarios (se requieren sociólogos, arquitectos, diseñadores, ingenieros, constructores, ambientalistas, abogados, etc.), y que no se debe dejar la toma de decisiones de construcción de ciudad solamente en manos de abogados o políticos de turno.

Una de las propuestas en el corto plazo puede ser ofrecer un diplomado en iluminación focalizado en la parte arquitectónica constructiva, en los temas de espacios y artes efímeras, que fomente la construcción de ciudad generando proyectos con alianzas público-privadas para su desarrollo.

A mediano plazo se podrá pensar en una maestría de iluminación en la que se busque y estimule la interdisciplinariedad y se consoliden los grupos de diseñadores en la construcción de ciudad a través de la iluminación.

Mejorar el dominio de la reglamentación y normatividad vigente para instalaciones técnicas en edificaciones Retie (Ministerio de Minas y Energía, 2021), Retilap (2021a), Retsit (2021b) también forma parte de los retos. Y llegar al punto de ser partícipes en la modificación de los reglamentos como entes consultivos. Para ello, la universidad debe proporcionar y estimular que tanto estudiantes como docentes se involucren en los comités de trabajo de la elaboración de reglamentación, en los esquemas de ordenamiento de los municipios y ser propositivos en alternativas del manejo de la luz con proyectos aterrizados a las vigencias presupuestales y a un entorno ambiental sostenible.

Dado el déficit manifestado por el Organismo Nacional de Acreditación (Onac) en cuanto a laboratorios de iluminación, es necesario crear a mediano y largo plazo un laboratorio de luminotecnia en la Sede Medellín, enfocado en iluminación arquitectónica y paisajística, sin dejar de lado la rigurosidad técnica.

Finalmente, realizar el segundo Encuentro Internacional de Diseño de Iluminación (EIDIL) de la Universidad Nacional de Colombia, que a diferencia de otros encuentros de iluminación, tiene un perfil más académico, y continuar promoviendo ejercicios prácticos de diseño de iluminación interactiva dentro de la Sede y consolidarlos con implementaciones reales.

FUTURO DE LA ILUMINACIÓN EN LA ARQUITECTURA Y LA CONSTRUCCIÓN

En los próximos diez años seguirá el reinado de la tecnología LED; sin embargo, vienen desarrollos tecnológicos para los próximos treinta años en los que ya no se hablará de luminarias, sino de superficies luminosas

controladas automáticamente. Es el caso de la compañía Rohinni (s.f.), con más de noventa patentes disruptivas de la tecnología actual, que nos presentan “superficies luminosas”, al igual que el desarrollo de fuentes de luz plana usando una pantalla de fósforo con nanotubos de carbono de pared simple como emisores de campo (Bahena-Garrido *et al.*, 2014). El reto de los diseñadores será el deslumbramiento y los efectos en el comportamiento humano y demás seres vivos, y la utilización de la luz en las materialidades constructivas, como los cerramientos de las diferentes edificaciones.

REFERENCIAS

- Bahena-Garrido, S.; Shimoi, N.; Abe, D.; Hojo, T.; Tanaka, Y. y Tohji, K. (2014). Plannar light source using a phosphor screen with single-walled carbon nanotubes as field emitters. *Review of Scientific Instruments*, 85, 104704, <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4895913>
- Comisión de Regulación de Comunicaciones. (2021). Reglamento de redes internas de telecomunicaciones. Recuperado de <https://www.crcom.gov.co/es/pagina/implementacion-reglamento-redes-internas-telecomunicaciones>
- Conpes. (2018). Consejo Nacional de Política Económica y Social, Conpes 3919, Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B13micos/3919.pdf>
- EILD. (2014). Encuentro Iberoamericano de Lighting Design, Medellín. Recuperado de <http://es.eild.org/eild-2014-medellin/>
- El País. (2013, diciembre). La ONU proclama 2015 el Año Internacional de la Luz. Recuperado de https://elpais.com/sociedad/2013/12/23/actualidad/1387824975_214879.html
- Facultad de Arquitectura Universidad Nacional de Colombia (UNAL) (diciembre, 2018). Bocetos - Sede Medellín. Incluminación: proyecto de extensión solidaria. Recuperado de <https://youtu.be/RSKNAtFe3MM>
- Fise. (2013). Feria Internacional del Sector Eléctrico, www.fise.co
- Fiec. (2020). La Feria de Iluminación + Electricidad Colombia. Recuperado de <https://feriailuminacion.com/sobre-la-feria/>
- Goeritz, M. (2015). Manifiesto de la Arquitectura Emocional, 1953. Museo Experimental El Eco. Recuperado de <http://eleco.unam.mx/eleco/manifiesto-de-la-arquitectura-emocional-1953/>
- Highlights. (2021). Salud e iluminación enfocada al ser humano. Recuperado de <https://highlights.com.co/catalogos-high-lights/>
- Iluminet. (junio 22 de 2011). Diplomado en Diseño de Iluminación en Colombia (Colegiatura Colombiana). Recuperado de <https://www.iluminet.com/diplopmado-en-diseno-de-iluminacion-en-colombia/>
- Iluminet. (octubre 9 de 2012). Luxamérica 2012 en Cartagena, Colombia. Recuperado de <https://www.iluminet.com/en-octubre-luxamerica-2012-en-carta2gena-colombia/>

- Iluminet. (julio 18 de 2012a). Diplomado de diseño de iluminación en Medellín, Colombia. Recuperado de <https://www.iluminet.com/proximo-a-iniciar-diplomado-de-diseno-de-iluminacion-en-medellin-colombia/>
- Iluminet. (junio 1 de 2016). ASDLUZ apoya el producto colombiano. Recuperado de <https://www.iluminet.com/asdluz-producto-colombiano-iluminacion/>
- Iluminet. (septiembre 11 de 2018). Celebrará Medellín Encuentro Internacional de Diseño de Iluminación. Recuperado de <https://www.iluminet.com/encuentro-internacional-iluminacion-colombia/>
- Lévano, D. (2013). Un litro de luz. *Litro de Luz*, 2(2), 122.
- Liter of Light (2021). ¿Qué es un litro de luz? Recuperado de <https://literoflight.org/>
- Luci Association. (2021). Recuperado de <https://www.luciasociation.org/map-city/medellin-2/>
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). Reglamento técnico de instalaciones eléctricas. Recuperado de www.minenergia.gov.co/retie
- Ministerio de Minas y Energía. (2021a). Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público. Recuperado de www.minenergia.gov.co/retilap
- Ministerio de Minas y Energía. (2021b). Reglamento técnico de sistemas e instalaciones térmicas. Recuperado de <https://www.minenergia.gov.co/sistemas-instalaciones-termicas>
- Oficina de Gestión Ambiental. (2016). Programa de uso racional y eficiente de energía - Proure. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Oficina de Gestión Ambiental. (2017). Plan de gestión integral de energía. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Philips. (2021). Iluminación que favorece la curación. Recuperado de <https://www.lighting.philips.com.mx/sistemas/sistemas-de-iluminacion/healwell>
- Rohinni. (s.f.). Superficies luminosas. Recuperado de <https://www.rohinni.com/>
- Rojas L., M. (2011). *Medellín iluminada*. Medellín: Cinco.
- Saavedra, E.; Rey, J. y F., y Luyo, J. (2017). Sistemas de iluminación, situación actual y perspectivas. *Revista Científica Tecnia*, 26(2), 44, <https://doi.org/10.21754/tecnia.v26i2.57>
- Significar. (2021). Solución de iluminación para la habitación del paciente. Recuperado de <https://youtu.be/b4avz4Jr6YU>

- Ruaf. (2001). *Urban Agriculture Magazine*, 1(1), 1-29. Recuperado de <https://ruaf.org/assets/2020/01/RAU1.pdf>
- The Nobel Prize. (2021). The Nobel Prize in Physics 2014. Recuperado de <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2014/advanced-information/>
- UNDP. (2021). Objetivo 4: Educación de calidad. Recuperado de <https://www.co.undp.org/content/colombia/es/home/sustainable-development-goals/goal-4-quality-education.html>
- UNDP. (2021a). Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles. Recuperado de <https://www.co.undp.org/content/colombia/es/home/sustainable-development-goals/goal-11-sustainable-cities-and-communities.html>
- Universidad Nacional de Colombia. (2021). Especialización en Iluminación Pública y Privada. Recuperado de <https://ingenieria.bogota.unal.edu.co/es/formacion/especializacion/especializacion-en-iluminacion-publica-y-privada.html>
- Universidad Nacional de Colombia. (2021a). Luxamérica 2020 - XV Congreso Iberoamericano de iluminación. Recuperado de <https://ingenieria.bogota.unal.edu.co/uec/?p=12333>
- Universidad Nacional de Colombia. (2021b). La Gliptoteca *Tótem mítico de las selvas* estrena iluminación. Recuperado de <https://medellin.unal.edu.co/noticias/1503-la-gliptoteca-totem-mitico-de-las-selvas-estrena-iluminacion.html>
- Villanueva-Meyer, M. (noviembre, 2010). La arquitectura emocional, *Galenus* 20. Recuperado de <http://www.galenusrevista.com/?La-arquitectura-emocional&recherche=aruitectura%20emocional>

Lista de figuras y tablas

CAPÍTULO 1

Tabla 1.	Definiciones y tipos de sistemas en la edificación	36
Tabla 2.	Sistemas, subsistemas, componentes y sus funciones dentro de la edificación	37
Tabla 3.	Factores y consideraciones contempladas en el diseño de los sistemas de la edificación	39

CAPÍTULO 2

Tabla 1.	Modelo condicionante funcional - Espacio y estructura	68
Tabla 2.	Modelo condicionante funcional - Espacio diseño	70
Tabla 3.	Modelo condicionante integridad - Acciones mecánicas	73
Tabla 4.	Modelo condicionante Integridad - Acciones físicas agua	76
Tabla 5.	Modelo condicionante producción - Materiales	80
Tabla 6.	Modelo condicionante eficiencia productiva - Técnica constructiva	85
Tabla 7.	Modelo condicionante eficiencia productiva - Contexto socioeconómico	88

CAPÍTULO 3

Tabla 1.	Plantas más comunes de donde se extraen las fv para el concreto	97
Figura 1	Planta de fique o cabuya de un cultivo de Copacabana, Antioquia	98
Figura 2.	a) Desfibrado de la hoja de fique; b) Fibra lavada y peinada	98
Tabla 2.	Propiedades de las fibras vegetales utilizadas para el refuerzo en el concreto	101
Tabla 3.	Factores de las fv que influyen en las características del concreto fibro-reforzado	103
Tabla 4.	Sistemas para la preparación de concretos reforzados con fv	106
Figura 3.	Rotura de las vigas: a) viga sin fibra de refuerzo; b) viga con fibra de refuerzo	112

CAPÍTULO 4

Figura 1.	Vivienda Nasua. Rionegro, Antioquia. Mampostería en bloques de suelo cemento BSC; energía solar y reúso de aguas lluvia	129
Figura 2.	Bloque 19A, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Mampostería en concreto con agregados reciclados	130
Figura 3.	Terra Biohotel, Medellín, Colombia. Edificio construido con bloques de concreto reciclado, iluminación y ventilación natural de habitaciones	131

CAPÍTULO 5

Figura 1.	Ciclo de vida tradicional de gestión en la construcción de una edificación.	144
Figura 2.	Dimensiones del ciclo de la digitalización	152
Figura 3.	Correspondencia entre niveles de intervención y la profundidad del cambio	155
Figura 4.	Esquema de trabajo interdisciplinar y transdisciplinar para un proyecto	157
Figura 5.	Variables para gestionar la información en el desarrollo de un proyecto	161
Figura 6.	Modelo conceptual de la apropiación tecnológica a través de una gestión dinámica	163
Figura 7.	Elementos habilitantes de la gestión la construcción	165

CAPÍTULO 6

Figura 1.	Iluminación patrimonial	176
Figura 2.	La Iluminación como identidad cultural	177
Figura 3.	Iluminación arquitectónica del patrimonio	179
Figura 4.	Iluminación en el exterior, la noche como una oportunidad	180
Figura 5.	Iluminación nocturna paisajística	182
Figura 6.	La sombra como reflejo de la naturaleza	184
Figura 7.	Fachada nocturna	185
Figura 8.	Fachada nocturna	187
Figura 9.	La Gliptoteca, <i>Tótem mítico de las selvas</i>	188

Índice temático

A

aguas lluvia 125, 128-130

C

Comisión Corográfica 75, 90

competitividad 137, 147, 153, 166

concreto 5, 10, 22-23, 25, 63, 91, 93-95, 97, 99-105, 108-109, 111-115, 117, 123, 126,
128, 130-132

reciclado 130-132

construcción

arquitectónica 5, 10, 13, 15-16, 18

civil 15-16

sostenible 5, 10, 121, 129, 131-132

constructabilidad 144-145

D

digitalización 146-147, 151-153, 156, 164-165

E

economía semicircular 129

efecto halo 152, 154

eficiencia energética 11, 176, 186, 188, 190

energía 19, 108, 113-114, 123, 126-129, 132, 178, 182-183, 185, 188, 194

F

fachadas 37, 74, 95, 128

fibras vegetales 5, 10, 22, 91, 95, 98, 101-102, 104, 115

fragilidad 93, 95, 108, 113

funcionalidad 25, 62, 63-64

G

gestión de la construcción 137-138, 140, 142-143, 145-146, 148, 150-151, 153, 155-
156, 158-159, 164-165

H

hábitat 125-126

huella ecológica 123

I

iluminación 11, 30, 127, 129, 131-132, 175-191, 193-195

 biodinámica 186

 diseño 179-182, 184, 191, 194

integridad 55, 58, 61-63, 65, 71-74, 76-77, 89

O

organización espacial 68-69

P

producción 55-56, 60-64, 77-78, 80, 82, 89

productividad 138, 141, 146-147, 163, 170

R

resistencia

 a la compresión 93, 108

 a la flexión 102, 107, 109-111, 114-115

respuesta física 71-72, 76

respuesta mecánica 65, 71-72

S

sistema constructivo 9, 10, 17-18, 21, 24, 26, 27-35, 41-42, 44-48, 53-56, 58, 60-61, 72,
74, 76, 79, 81, 87, 90, 99, 128

subsistemas constructivos 22, 25, 63

T

técnica 18-20, 22-23, 26, 39, 43, 46, 55-56, 58, 79, 81-84, 87, 125, 128, 140, 142, 169,
181-182, 191

 constructiva 83-84

tecnología

 apropiada 21

 industrializada 22

 de conservación 17, 27

 de constitución 17, 26-28, 40-41

 producción 17, 27, 39-41

tenacidad 95, 102, 112-115

tracción

 directa 109

 indirecta 109

U

utilidad 25, 31, 55, 58, 61-63, 71, 77-78, 89, 181

La obra que está ahora en sus manos tiene un sentido esencial: invitar a todo posible lector, más allá de si posee o no conocimientos previos sobre los temas tratados, a introducirse en la comprensión de los aspectos de la vida en sociedad, en el marco del análisis de las formas de vida humana, de la convivencia en lo urbano, de su identificación y configuración en lo territorial, de aspectos relacionados con la construcción y configuración de su hábitat, de las dinámicas históricas, así como de las expresiones y manifestaciones culturales inherentes a esta coexistencia.

Se reúnen acá, por ello, significativas reflexiones y experiencias de expertos académicos que, desde la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, se han concentrado en el análisis de las complejas y diversas problemáticas de la vida humana en el ámbito de las arquitecturas, de lo urbano-territorial, de la construcción material como reflejo de lo cultural, y de las expresiones humanas en el ámbito de lo social y de las artes, como aporte fundamental y necesario para la comprensión de las realidades que compartimos.

