

TC-9

**LA CONSTRUCTIVIDAD DEL DISEÑO ARQUITECTÓNICO:  
CÓMO MEJORAR LA EFICIENCIA DE CONSTRUCCIÓN  
DESDE EL DISEÑO**

Loyola, Mauricio / Goldsack, Luis  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, Santiago, Chile  
mloyola@uchile.cl

**1.- INTRODUCCIÓN**

El concepto de constructividad describe el grado en el cual un determinado diseño facilita su construcción, sujeto a todos los requerimientos del cliente y del proyecto. Un diseño con un alto grado de constructividad es aquel que toma en cuenta las particularidades de los procesos constructivos y permite desarrollar obras más rápidas, eficientes, y seguras. Por el contrario, un diseño con un bajo grado de constructividad es aquel que tiene características que obligan a tener faenas más difíciles, ineficientes o inseguras.

Aunque el concepto de “constructividad” es relativamente reciente, la idea esencial de obtener procesos constructivos fáciles y eficientes ha existido siempre como un objetivo de los diseños de arquitectura. Sin embargo, durante las últimas décadas, la progresiva especialización de la industria ha derivado en una separación tal entre diseño y (conocimiento de) construcción que finalmente terminan los proyectos no siempre consideran completamente los aspectos prácticos de su construcción e implícitamente originan problemas en obra. La industria ha parcialmente respondido a este problema a través de la masificación de “revisiones de constructividad/constructabilidad”, en las cuales los constructores examinan los diseños y, basados en su propia experiencia y conocimiento práctico, tratan de prever problemas o anticipar conflictos. Aunque beneficiosos, estos sistemas tienen el inconveniente que se basan casi exclusivamente en el conocimiento tácito de los constructores (*expertise*), de manera que su efectividad varía enormemente dependiendo del equipo del proyecto, no son generalizables ni transferibles y son de muy difícil control.

En este contexto, diversas iniciativas académicas y profesionales han intentado crear un sistema estandarizado o formal de evaluación y mejora de la constructividad. El principal obstáculo ha sido la falta de un sistema de organización que permita integrar y ordenar el conocimiento de

constructividad que actualmente se encuentra disperso, fragmentado, y en su gran mayoría, no formalizado en ningún tipo de soporte (Hanlon y Sanvido, 1995).

En respuesta a este panorama, esta investigación plantea un sistema de organización y ordenamiento del conocimiento de constructividad útil para el diseño que permite ordenar, justificar, sintetizar, transmitir y aplicar el conocimiento, tanto el existente como el que está por crearse.

## 2.- REVISIÓN DE LITERATURA

El concepto de constructividad ("*buildability*") fue acuñado a comienzos de los 80's por el *Construction Industry Research and Information Association* (CIRIA) en el Reino Unido para referirse explícitamente a la manera en la que el diseño de un edificio facilita su construcción (CIRIA, 1983). Algunos años más tarde, el *Construction Industry Institute* (CII) en Estados Unidos propuso el concepto de constructabilidad ("*constructability*") para referirse al impacto de todas las etapas y actividades del proyecto (planificación, diseño, logística, operaciones) en la eficiencia de construcción (CII, 1986). A pesar de la diferencia conceptual, durante los años siguientes los términos han sido comúnmente utilizados en forma intercambiada.

Diversos autores han propuesto diferentes mecanismos y modelos para formalizar el conocimiento de constructividad, sin existir todavía un resultado satisfactorio para todos (Griffith y Sidwell, 1997). En general, se pueden distinguir cuatro tipos de iniciativas: 1) conjuntos de recomendaciones y/o reglas específicas, 2) síntesis de factores y/o principios generales, 3) clasificaciones de factores y 4) modelos integradores.

El primer grupo comprende compilaciones de recomendaciones o buenas prácticas. CIRIA (1983), CII (1986; 1987), Adams (1990) y CIIA (1992) desarrollaron conjuntos de guías o recomendaciones derivadas de conceptos generales de construcción. La misma estructura fue seguida posteriormente por otras series de recomendaciones planteadas por Wright (1994) y Crowther (2002).

Otros autores han propuesto métodos para clasificar y ordenar estas reglas o recomendaciones generales a partir de variables como especificidad, contenido o contexto de aplicación (Ferguson, 1989; O'Connor et al., 1987; Fischer y Tatum, 1997; Hanlon y Sanvido, 1995; Wong et al.,

2006b). Paralelamente, otros autores han desarrollado clasificaciones del conocimiento de constructividad pero en áreas específicas, tales como diseño de armaduras de acero (Fischer, 1991), hormigón armado (Boeke, 1990), encofrados (Touran, 1988; Hanna, 1989), instalaciones (O'Connor et al., 1987), prefabricación (Tatum et al., 1986), o ingeniería civil (Hassan, 2005).

A partir de esta información clasificada, un cuarto grupo de autores ha propuesto modelos integrales de información y conocimiento de constructividad/constructabilidad (*Constructability Information Model*, Hanlon y Sanvido, 1995; *Conceptual Product/Process Matrix Model*, Pulaski y Horman, 2005; modelo integración tridimensional, Chen y McGeorge, 1994; modelo de flujos de información, Woon, 2006, Formoso et al., 1998; modelo de integración con tecnologías BIM y VDC (Thabet, 1999; Fischer, 2006).

Modelos de formalización que salen del ámbito académico y son aplicados en la industria son el *Building Design Appraisal System* de Singapur (BCA, 2005) y el *Buildable Assessment Model* en Hong Kong (Lam et al., 2006; Wong et al., 2006a).

### 3.- METODOLOGIA

Este estudio utilizó un enfoque cualitativo, de tipo exploratorio.

En la primera etapa, se realizó una exhaustiva revisión de literatura documentando esfuerzos de recolección, clasificación y ordenamiento de conocimiento de constructividad y constructabilidad. Las fuentes incluyeron artículos académicos, manuales de construcción, guías prácticas. Se realizó un análisis cualitativo de contenido que categorizó la información según detalle y contenido, que sintetizó la información en 22 grupos o *clusters* temáticos.

En la segunda etapa, la información recolectada fue presentada ante 12 profesionales del sector privado reconocidos como expertos por sus pares, en entrevistas individuales, quienes la complementaron y reorganizaron. La información fue complementada el análisis de 3 casos de estudio de proyectos de construcción a los que se les hizo seguimiento durante 4 meses.

En la tercera etapa, toda la información fue cruzada, categorizada y ordenada en un modelo de organización que, luego de 2 iteraciones de síntesis, concluyó en el modelo aquí propuesto.

En la cuarta etapa, el modelo se validó con 2 *focus groups* con profesionales y académicos del área de diseño y construcción, testeando su comprensión, funcionalidad y aplicabilidad.

## **4.- RESULTADOS**

### **4.1. Modelo de Organización de Conocimiento de Constructividad**

El modelo de Organización de Conocimiento de Constructividad es un sistema de organización de conocimiento que permite ordenar en forma sistemática, jerárquica, sintética y accesible el conocimiento de constructividad existente y el que está por crearse, desde una perspectiva operativa y útil para el diseño, especialmente para las fases iniciales de proyecto.

El modelo plantea cuatro formatos de formalización de conocimiento de constructividad: Factores, Principios, Pautas y Reglas. Los cuatro formatos están diferenciados por nivel de especificidad, contexto de aplicación, dimensión del conocimiento y orientación de diseño, respondiendo a las diferentes necesidades de información del arquitecto a lo largo del proceso de diseño.

Los factores y principios de constructividad son universales y equivalentes en todos los proyectos. Las pautas y reglas, en cambio, son dependientes del contexto (tecnológico, físico, temporal, humano) en que fueron definidas y sólo son aplicables cuando se repiten las mismas condiciones contextuales, por lo que varían de proyecto en proyecto.

### **4.2. Factores de Constructividad**

Los factores de constructividad son indicadores de lo que debe ser considerado en las decisiones de diseño, de una manera general y no prescriptiva. Son propios del (buen) diseño en general, siendo aplicables en la amplia mayoría de las situaciones, aunque con diferencias de intensidad (en cierto diseño un factor puede ser más importante que otro). Los factores de constructividad son especialmente útiles durante las primeras fases de diseño, en las cuales se analiza el problema de estudio y se comienza a detectar aquellos aspectos claves que definen el proyecto. Al igual que lo que normalmente se realiza con otras variables de proyecto (*e.g.* programáticas, ambientales, legales, urbanas, etc.), la realización de un análisis preliminar de constructividad basado en los factores de constructividad permite detectar posibles dificultades o limitantes

importantes eventuales en la etapa de construcción y, por lo tanto, definir restricciones y/o directrices generales para el diseño.

Existen 10 factores de constructividad, detallados a continuación.

### **a) Mano de obra**

Se refiere a la consideración de las características técnicas, productivas, económicas y socioculturales del grupo humano (obrero y profesional) necesario para la realización de las tareas de construcción definidas por el proyecto. A igualdad de condiciones, son diseños con menor grado de constructividad aquellos que requieren mano de obra especializada, que tengan soluciones desconocidas para la mano de obra disponible, que requieran una gran cantidad de trabajadores, que necesiten mayor supervisión técnica, que sobreexijan las capacidades de los trabajadores o que requieran mano de obra que no es fácil de obtener localmente, entre otras situaciones.

Por ejemplo, un proyecto que deba ser realizado en una zona rural con mano de obra local sin experiencia en construcción representa un desafío para su construcción. A fin de aumentar el grado de constructividad, el diseño podría, entre otros, 1) plantear detalles que consideren tolerancias mayores a los estándares normales, 2) minimizar la cantidad de componentes y elementos en otra, 3) plantear un sistema constructivo modulado de modo que las tareas en obra sean repetitivas y de rápido aprendizaje, 4) reducir el número de operaciones *in situ* planteando un sistema prefabricado de simple montaje y considerar la mano de obra local sólo para tareas básicas, etc.

### **b) Procedimientos constructivos**

Se refiere a la consideración de la cantidad, variabilidad, complejidad de realización, riesgo asociado e interrelación entre los procedimientos constructivos necesarios para la realización de las tareas de construcción definidas por el proyecto. A igualdad de condiciones, son diseños con menor grado de constructividad aquellos que requieren procedimientos constructivos desconocidos para el equipo constructor, que requieran muchos pasos o etapas, que requieran mayor cantidad de tareas secundarias o auxiliares (e.j. andamiaje), que varíen durante el transcurso de la obra, que tengan mayores posibilidades de error o que exijan mayor precisión,

que impidan el desarrollo de trabajos en paralelo, o que tengan riesgo de daño en trabajos subsecuentes, entre otras situaciones.

Por ejemplo, el uso de sistemas de ductería flexible a base de polietileno reticulado (PEX) elimina la necesidad de uniones, racores y *fittings* característicos de las uniones de cobre para lograr las curvaturas de tendido, y reemplaza las conexiones terminales por uniones a presión, rosca y encaje. Dada su flexibilidad, también permite tender las redes con mayor libertad entre elementos estructurales (sin necesidad de cortes) y debido a su condición de material inerte, las uniones no corren riesgo de sufrir corrosión electrolítica. Es notablemente más ligero y fácil de transportar y almacenar. En otras palabras, este sistema de ductería demanda un procedimiento constructivo que tiene menor cantidad y complejidad de tareas de construcción, y por lo tanto, mayor constructividad.

Otro ejemplo característico es el de una celosía metálica que tenga puntos de anclaje embutidos en pilares de hormigón arquitectónico (a la vista), pues obliga a realizar tareas con precisión de terminación en la etapa de obra gruesa (dejar los anclajes embebidos en el hormigón fresco). A fin de aumentar el grado de constructividad, una solución alternativa podría plantear una pletina de conexión embebida en el hormigón a la que posteriormente se suelde la estructura de celosía (lo que da un rango de ajuste), o cambiar la celosía embebida por una estructura metálica sobrepuesta al pilar de hormigón.

### **c) Herramientas, equipos y maquinarias**

Se refiere a la consideración de las características técnicas, tecnológicas y de operabilidad de todas las herramientas, equipos y maquinarias necesarias para la realización de las tareas de construcción definidas por el proyecto. A igualdad de condiciones, son diseños con menor grado de constructividad aquellos que no consideran las necesidades de las herramientas, equipos y maquinarias, generando complicaciones de uso en terreno, o que obligan a que las herramientas sean utilizadas bajo su umbral óptimo de rendimiento, afectando la eficiencia en obra, entre otras situaciones.

Por ejemplo, el nivel de dificultad de realización de pilares curvos en hormigón a la vista puede cambiar significativamente según el grado en el cual el diseño considere los equipos disponibles en el mercado. Con todo lo demás constante, un diseño con alto grado de constructividad sería

aquel que respeta los diámetros de encofrados metálicos industriales existentes comercialmente. Por el contrario, un diseño con menor grado de constructividad sería aquel que, descuidando este factor, especifique un diámetro arbitrario, lo que obliga al equipo constructor a realizar encofrados especiales, probablemente con madera, lo que es una faena adicional y con mayor probabilidad de error e incumplimiento de tolerancias. En muchas ocasiones, la diferencia entre el diámetro ideal de cálculo y el disponible comercialmente es despreciable.

#### **d) Materiales**

Se refiere a la consideración de las características físicas, mecánicas y tecnológicas de los materiales, productos, insumos y materias primas sobre cuales se ejecutan las acciones necesarias para la realización de las tareas de construcción definidas por el proyecto. A igualdad de condiciones, son diseños con menor grado de constructividad aquellos que especifiquen materiales frágiles o delicados, difíciles de almacenar y/o transportar, de grandes dimensiones o peso, que tengan dimensiones o diseños incompatibles con otros productos, inestables, de rápida caducidad u obsolescencia, tóxicos o peligrosos, que requieran procedimientos constructivos de mayor complejidad, que necesiten herramientas específicas o que sean de disponibilidad limitada en el contexto del proyecto tienen menor grado de constructividad, entre otras situaciones.

Por ejemplo, los revestimientos de muros a base de paneles de materiales pétreos (*e.g.* mármol) son, por lo general, frágiles, se quiebran o rayan con facilidad; se manchan cuando son porosos y en ocasiones no pueden siquiera estar en contacto con agua (alabastro). Deben ser almacenados en lugares secos y sin vibraciones, y son difíciles de manipular debido a su peso y fragilidad inherente. Requieren de maquinarias, herramientas y mano de obra especializada, las que son, corrientemente, escasas. Ante estas complejidades conocidas, con todo lo demás constante, a fin de aumentar el grado de constructividad, un diseño que considere este tipo de material para revestimiento podría, entre otros, 1) cambiar la modulación de manera de tener paneles más pequeños y compactos, lo que disminuye el peso y permite la manipulación por obreros sin necesidad de maquinaria, 2) estudiar la relación geométrica entre espesor y largo/ancho a fin de disminuir el riesgo de fractura, 3) proponer un sistema de cuelgue o anclaje al muro que permita que el revestimiento sea instalado al final de la obra, cuando menos

riesgos existen para el material; 4) diseñar canterías y separaciones que permitan esconder tolerancias de montaje, etc.

### e) Clima

Se refiere a la consideración de la intensidad y características de las condiciones climáticas, atmosféricas y ambientales de la(s) zona(s) en la(s) que se desarrollarán tareas de construcción definidas por el proyecto. A igualdad de condiciones, son diseños con menor grado de constructividad aquellos que, conociendo las condiciones climáticas del sitio de construcción, consideran tareas de construcción que son difíciles, demandantes o riesgosas, como por ejemplo, la realización de tareas a la intemperie en climas agrestes (alta radiación solar, temperaturas extremas, alta oscilación térmica, abundantes precipitaciones, vientos fuertes, humedades extremas, alta salinidad, poco oxígeno, etc.), entre otras situaciones.

Es importante precisar que no es el clima agresivo propiamente tal el que determina el grado de constructividad, sino la respuesta de diseño en cuanto a nivel de anticipación, previsión y facilitador de desarrollo de tareas de construcción en forma protegida. El equipo no puede decidir cambiar o no el clima para mejorar la constructividad, pero lo que sí puede hacer es cambiar el diseño para anticipar dificultades y especificar tareas de construcción que pueden ser desarrolladas en forma protegida y controlada.

Por ejemplo, las faenas de hormigonado con temperaturas muy bajas o con riesgo de congelación son complejas pues amenazan la concreción de la reacción química de la mezcla. Existen diversos mecanismos para desarrollar hormigonado estructural tradicional en estas condiciones, pero otras faenas como estucado, mortero proyectado (*shotcrete* y/o *gunite*) son extremadamente difíciles. A fin de aumentar el grado de constructividad, en un contexto frío o polar el diseño podría reemplazar este tipo de soluciones por una materialidad de terminación en seco tales como paneles de acero pre-pintado, revestimientos de PVC o —manteniendo la materialidad original— hormigón arquitectónico o paneles de hormigón prefabricado (e.g. sistemas tilt-up), con junta seca, entre otros.

**f) Terreno**

Se refiere a la consideración de las características topográficas, geotécnicas y ambientales del terreno del proyecto y su entorno inmediato, y por el grado de incertidumbre que se tenga sobre ellas. A igualdad de condiciones, son diseños con menor grado de constructividad aquellos que obliguen a realizar tareas de precisión en terrenos con formas complejas, que impliquen mantener múltiples niveles en terrenos irregulares, que deban ajustarse con exactitud a diferentes medianeros, que impliquen almacenar o transportar materiales en pendientes irregulares, que sobrerrequieran la construcción de andamios, plataformas o estructuras auxiliares de nivelación, que demanden maquinaria pesada en terrenos inestables, que requieran excavaciones peligrosas, que deban proteger elementos inamovibles dentro del terreno (e.g. árboles, monumentos), entre otras situaciones.

Por ejemplo, los terrenos con pendientes irregulares, escarpadas o abruptas representan escenarios difíciles para construir: se dificulta el desplazamiento interno para la mano de obra, maquinarias y para materiales; se dificulta el almacenamiento de materiales y la instalación de faenas; se dificulta el cerramiento de la obra, etc. A fin de aumentar el grado de constructividad, un diseño podría, entre otros: 1) plantear una volumetría general que concentre la mayor parte del programa en una zona plana existente; 2) plantear un diseño que respete estrictamente las curvas naturales del terreno, 3) plantear una zona general plana cercana al acceso general al sitio que sirva también para la instalación de faenas, 4) plantear un diseño con más de un acceso a obra, por ejemplo, uno superior (a favor la pendiente) y uno inferior (contra de la pendiente), etc.

**g) Accesibilidad**

Se refiere a la consideración de la cantidad y calidad de espacio libre disponible al interior del terreno y por la capacidad de carga de las vías de acceso a la(s) zona(s) donde se desarrollarán las tareas de construcción definidas por el proyecto. A igualdad de condiciones, son diseños con menor grado de constructividad aquellos que involucren u obliguen trabajos en terrenos vecinos, que requieran mayor instalación de faenas y/o almacenamiento de materiales, que especifiquen materiales y productos de grandes dimensiones que requieran gran cantidad de espacio para su manipulación, que presenten detalles complejos o inaccesibles, entre otras situaciones.

La consideración de la accesibilidad se debe hacer en todas las escalas posibles, desde la consideración de espacio libre para instalaciones de faenas y equipos o maquinarias, la accesibilidad de los trabajadores al sitio de trabajo, hasta la accesibilidad al detalle o punto exacto de elemento de operación.

Por ejemplo, un proyecto de edificios de oficinas típicamente contempla una torre con espacio público libre en primer piso, y un complejo de estacionamientos subterráneos den toda la extensión del terreno. Usualmente la losa de primer piso se diseña de manera de soportar la carga normal de uso. Esta decisión impide sobrecargar la losa con maquinaria pesada durante la construcción, como un camión *mixer* con concreto, obligando a mantener ese espacio valioso de trabajo sólo con carga liviana. En el caso del concreto, la distancia adicional requerida para estacionar el camión es especialmente relevante si se utiliza hormigón bombeado, pues aumenta la exigencia de presión, demandando bombas más poderosas (y costosas) o rebombeo intermedio. A fin de aumentar el grado de constructividad, un diseño podría reforzar una zona parcial de la losa (lo que es un costo marginal en términos de estructura), permitiendo su uso como plataforma de carga pesada en la proximidad inmediata a la torre.

## **h) Tiempo**

Se refiere a la consideración de la cantidad de tiempo que se requiera para realizar las tareas de construcción definidas por el proyecto. A igualdad de condiciones, son diseños con menor grado de constructividad aquellos que involucren tareas que no se puedan realizar en determinados horarios restringidos por legislaciones o regulaciones locales, que requieran tareas de construcción con tiempo de ejecución más lentos que el resto de las faenas, que requieran tareas con tiempos muertos de espera, que requieran tareas con ritmos muy disonantes que entorpecen la programación, entre otras situaciones.

Por ejemplo, las faenas de concreto *in situ* en entornos urbanos céntricos representan un verdadero desafío de programación de obras. Por lo general, durante el día, el acceso y circulación de camiones está restringido; y durante la noche, la emisión de ruidos molestos está prohibida. Los administradores deben conciliar ambas situaciones, programando la llegada de camiones con áridos o con hormigón premezclado temprano en la madrugada, y desarrollar las faenas de concretado durante la mañana. Cualquier retraso (*e.g.* confección de armaduras o colocación de moldajes) obliga a postergar la programación hasta el día siguiente. Ante esto, a

fin de aumentar el grado de constructividad, el diseño podría minimizar la cantidad de concreto *in situ* y proponer un mayor grado de prefabricación de hormigón (e.g. sistemas *tilt-up*, elementos pretensados) o de elementos de acero.

### **i) Comunicación**

Se refiere a la consideración de la claridad, cantidad, especificidad y calidad de la información del proyecto diseñado y por la fluidez y calidad de comunicación entre el equipo diseñador y el equipo de construcción. A igualdad de condiciones, son diseños con menor grado de constructividad aquellos cuya documentación presenta problemas al equipo constructor para entender el proyecto, como por ejemplo, planimetrías incompletas, incoherentes o defectuosas, con ambigüedades, detalles incomprensibles, especificaciones insuficientes u obsoletas, con excesiva cantidad de dibujos, que requieran demasiados esfuerzos de cruce de información en distintos soportes, con falta de información sobre los procesos de montaje o construcción de los diseños, con planimetrías que no respetan los estándares y códigos de dibujo técnico, o con soportes gráficos incompatibles con el trabajo en obra, entre otras situaciones.

Cuando el equipo constructor no es capaz de interpretar en forma sencilla la documentación de proyecto y entender qué es exactamente lo que se debe o pretende construir, se añade una capa adicional e innecesaria de dificultad a la construcción. En el mejor de los casos, implica mayor tiempo de estudio, consultas al equipo diseñador y mayor cantidad de reuniones de coordinación son necesarias. En el peor de los casos, termina en la construcción de diseños equivocados, cambios de proyecto por errores de interpretación o errores que amenazan la calidad o seguridad en obra.

### **j) Coordinación**

Se refiere a la consideración de la coherencia, integración, y complemento entre las distintas especialidades que intervienen en el diseño del proyecto y por la fluidez y calidad de comunicación entre todos los integrantes y especialistas que conforman el equipo diseñador y el equipo de construcción. A igualdad de condiciones, son diseños con menor grado de constructividad aquellos que tienen proyectos de especialidades desarrollados en forma aislada, que tienen objetivos de diseño notablemente diferentes entre especialidades, que tienen vacíos de coordinación que deben resolverse en obra, que requieren de una gran cantidad de

especialidades y luego de equipos subcontratistas independientes en obra, o que los proyectos de especialidades se deben desarrollar durante el propio transcurso de obra, entre otras situaciones.

Un diseño con bajo nivel de coordinación (y por consecuente bajo grado de constructividad) es aquel en el que los distintos proyectos y subproyectos de especialidades, o las distintas fases o etapas de un mismo proyecto guardan poca coherencia en términos espaciales, estructurales, materiales, de secuencia constructiva, funcionales o más ampliamente, cuyos objetivos de diseño y/o requisitos de materialización están reñidos entre ellas. Cuando estas incompatibilidades no son detectadas durante el propio proceso de diseño, sino en obra, generan, en el mejor de los casos, detenciones en la línea productiva, dudas y consultas por parte del equipo constructor y pérdida de eficiencia; y en el peor, colisiones insalvables, cambios improvisados de proyecto, necesidad de trabajos rehechos o, más aún, falla en el cumplimiento de objetivos generales de proyecto.

### **4.3. Principios de Constructividad**

Los principios de constructividad son criterios básicos que orientan las decisiones de diseño, señalando la tendencia generalmente adecuada en la mayoría de las situaciones de diseño. Por lo tanto, son prescriptivos en un nivel general. En cierto modo, si el factor indica qué aspectos hay que considerar en una decisión de diseño, el principio señala la orientación hacia la cual se debe tomar la decisión. Los principios de constructividad son útiles en las etapas medias de diseño cuando las principales decisiones ya están parcialmente tomadas y comienzan a definirse los primeros detalles.

#### **a) Principio de simplicidad de tareas de construcción**

El principio de simplicidad es el más básico y natural de todos: consiste en la preferencia de características de diseño que impliquen tareas de construcción con menor dificultad unitaria, es decir, que sean más sencillas de realizar. Aunque extremadamente simple de comprender, es muy difícil de aplicar, pues los diseñadores no siempre pueden detectar lo que representa una tarea de construcción simple (Glavinich, 1995). Por ejemplo, es frecuente que diseños más "simples" sean malentendidos como tradicionales, simplistas, elementales o reduccionistas, y por tanto, poco atractivos. Sin embargo, Adams (1990) explica que "*un cascarón paraboloidal*

*hiperbólico de madera, un muro diafragma de ladrillo postensado, un pórtico de celosía triodésica de acero o una balsa flotante [pontón] de hormigón, son conceptos [geometrías] avanzados y heterodoxos y sin embargo, a las empresas constructoras les agrada la simplicidad de su construcción".*

En general, diseños más simples son aquellos que consideran los recursos y condiciones de construcción y que especifican características que se ajustan a ellas. Por lo mismo, no existen normas universales sobre qué es un diseño simple: lo que puede ser sencillo en un proyecto, puede convertirse en una solución de alta dificultad en otro. Para evaluar la simplicidad en un determinado proyecto, es necesario evaluar cada uno de los factores de constructividad, integrarlos y ponderarlos. Por ejemplo, un proyecto de cielo falso con estructura de madera y revestimiento de yeso cartón, es necesario elegir entre 1) modular la estructura de madera de acuerdo a las dimensiones de las planchas o 2) modular las planchas de acuerdo a las dimensiones de la madera. Con todo lo demás constante (capacidad estructural o capacidad de recibir instalaciones, etc.), la aplicación del principio de simplicidad obliga a analizar los factores de constructividad en ambas opciones y, a partir de ellos, evaluar la simplicidad de cada solución. En un contexto hipotético, se podría concluir que los cortes en las planchas de yeso-cartón, en comparación con los cortes en madera, requieren herramientas más complejas (factor: herramientas), mayor precisión en la acción de corte (factor: mano de obra), mayor tiempo de ejecución (factor: tiempo), son de mayor fragilidad (factor: materiales), y obliga a tareas secundarias como juntas (factor: procedimientos constructivos), entre otras razones, por lo que modular la estructura de madera de acuerdo a las dimensiones del yeso-cartón generaría una tarea de construcción de mayor simplicidad.

## **b) Principio de reducción de tareas de construcción**

Consiste en la preferencia de características de diseño que se construyan con una menor cantidad de pasos, etapas y tareas de construcción.

Este principio es sumamente importante porque es el argumento analítico que explica la promoción de industrialización y prefabricación como estrategias de diseño para aumentar la constructividad. Prefabricación e industrialización son dos términos diferentes, pero usualmente confundidos. La industrialización es el proceso productivo seriado que utiliza métodos, sistemas y técnicas racionalizadas, optimizadas, con intenso uso de tecnología y altamente controlables

para la elaboración de productos homogéneos, de calidad uniforme y de estándares de desempeño certificados. La prefabricación, en cambio, consiste en el proceso productivo en el cual tareas específicas de una obra de construcción son parcialmente desarrolladas fuera del sitio definitivo. Por ejemplo, las puertas son tradicionalmente un producto que se compra terminado a un proveedor, de dimensiones y características de desempeños conocidas y seriadas, que es fabricado en una planta industrial con procesos tecnológicos racionalizados y eficientes. La puerta es un producto industrializado; el diseño del edificio debe adaptarse a ella. En cambio, un proyecto de construcción de una iglesia en la cual la cúpula metálica principal sea fabricada en una industria y luego trasladada y montada en la torre, representa un ejemplo de prefabricación. En este caso, la cúpula se realiza específica y únicamente para ese proyecto y su (pre)fabricación respeta el diseño original. Industrialización y prefabricación representan dos aproximaciones distintas al mejoramiento de constructividad que operan bajo la lógica del principio de reducción de tareas de construcción. Tanto la utilización de puertas industrializadas, como la prefabricación de la cúpula en un lugar distinto al tope del campanario, permiten eliminar tareas en obra.

El principio de reducción de tareas no sólo se expresa en las estrategias de utilización de componentes industrializados o prefabricación de partes. Son las principales, pero no las únicas. La simplificación de detalles o de procesos constructivos por reducción de partes también representa aplicaciones efectivas de este principio. Por ejemplo, la utilización de paneles de madera contrachapada en los tabiques de madera aserrada como elemento estructural arriostrante, frente a la solución tradicional basada en el uso de diagonales, es un ejemplo de reducción de tareas, pues elimina las acciones de medición, corte, clavado, ajuste de diagonales, encastre de pies derechos y encamisado posterior del tabique, y las sustituye únicamente por el corte clavado de placa arriostrante.

### **c) Principio de reducción de variabilidad de tareas de construcción**

Consiste en la repetición y homogeneización de características de diseño que impliquen tareas de construcción similares, repetitivas y con menos variabilidad a lo largo del proyecto. Si el principio de reducción de tareas propone eliminar todas aquellas tareas que son prescindibles, y luego el principio de simplificación de tareas propone concentrarse en aquellas con menor

dificultad, el principio de reducción de variabilidad propone repetir las lo máximo posible en el proyecto a fin de tener el menor número de tareas diferentes.

Por ejemplo, en un proyecto de pequeño tamaño en albañilería confinada, la elaboración de armaduras para pilares y cadenas, así como los moldajes e incluso la preparación del hormigón probablemente serán realizadas a pie de obra por el equipo de obreros, utilizando métodos manuales y herramientas básicas. A fin de aumentar el nivel de constructividad del proyecto, el diseño podría estandarizar las secciones de elementos de hormigón armado a fin de reutilizar los moldajes el máximo posible y mantener consistencia en un tipo (dosificación) de hormigón, a fin de evitar posibles equívocos o contaminación del material. Las armaduras podrían ser idénticas en todas las vigas, cadenas y pilares respectivamente, con sólo dos dimensiones de fierros (principales y estribos) a pesar de la ineficiencia estructural que esto puede significar. De esta manera, los enfierradores, por ejemplo, pueden construir mesas con guías para la elaboración de estribos sin temor a equivocarse, y optimizar el tiempo realizando una tarea repetitiva.

Este principio se manifiesta en diversas estrategias (*i.e.* estandarización, normalización, modularización) que, si bien no exactamente iguales, comparten la misma lógica. La estandarización o normalización son dos conceptos que se refieren a lo mismo: la definición y utilización de normas o estándares que delimiten las características o condiciones de realización de un producto o proceso en un contexto determinado. Estandarizar en arquitectura significa definir con alta precisión las características de un cierto componente, subcomponente o proceso constructivo y utilizarlo con intensidad en el proyecto, a fin de homogeneizar y tener mayor control sobre el producto final. La modularización se refiere a la definición y repetición de una misma unidad, denominada módulo, en la construcción o elaboración de una totalidad mayor. En arquitectura, la modularización puede tener dos vertientes de significado: 1) el módulo representa una dimensión geométrica, que se toma como unidad de medida y sirve de base compositiva a través de su simple repetición o combinación con variantes proporcionales; 2) el módulo representa un elemento o conjunto de elementos constructivos, de carácter unitario, que se repite y articula con otros módulos equivalentes en la construcción de un proyecto. En ambos sentidos, el concepto esencial es la repetición de un mismo elemento previamente definido, sea de tipo geométrico o constructivo, que finalmente ocasiona que las tareas de construcción en obra sean también idénticas y repetitivas.

#### **d) Principio de flexibilidad de elección de tareas de construcción**

El principio de flexibilidad de elección de tareas de construcción es el menos intuitivo de todos; e incluso, es hasta cierto punto contra-intuitivo, especialmente en un contexto de formación de diseñadores como controladores absolutos de todo el proceso de producción de edificios. Consiste en la preferencia de características de diseño que tengan más de una manera de construirse, con un mismo resultado final, y en la posterior cesión al constructor de la elección de combinación de tareas de construcción que mejor se adapte a las condiciones de obra. En otras palabras, consiste en dejarle al constructor la posibilidad de elegir de qué manera será construido el diseño, siempre y cuando no se altere el resultado final.

Este principio se basa en la presunción que el conocimiento experto y específico sobre procesos de construcción es propio del constructor, no de los diseñadores. A partir de esto, se asume que las decisiones específicas en estas materias son, por definición, más óptimas cuando son tomadas por los constructores, ya que por su propia naturaleza privilegiarán el mejor y eficiente desarrollo de la obra. Basado en esta presunción, el principio de flexibilidad privilegia aquellas características de diseño que, salvaguardando el mismo resultado final —y esto es clave—, permiten que la elección de tareas de construcción necesarias sea tomada por el constructor. En términos prácticos, se trata de aumentar aquellas características de diseño que pueden ser construidas de varias maneras posibles y dejar que la elección final sea tomada por el constructor.

El principio de flexibilidad corre el riesgo de ser malinterpretado como una suerte de indefinición por parte del diseño: “este es el diseño y luego verá el constructor como lo construye”. Esta indefinición significa(ría) diseñar sin tomar en cuenta la realidad del proceso constructivo o sin considerar los factores de construcción, y eso es justamente lo que el enfoque de constructividad trata de evitar. En realidad, el principio de flexibilidad exige al diseñador ser totalmente consciente y comprometido con los procesos de construcción de sus obras, al punto de ser capaz de definir opciones de construcción, y dentro de esas opciones, dar al constructor la posibilidad de optar por la más eficiente según su propio criterio.

#### **4.4. Pautas de Constructividad**

Las pautas de constructividad son recomendaciones de diseño de carácter específico que derivan de la aplicación práctica de un principio en un contexto definido. Son ejecutables, observables y medibles. A diferencia de los factores y los principios, son específicas a un contexto determinado, y por lo tanto sólo son aplicables a los problemas de diseño que comparten las mismas condiciones. Por ende, no se pueden generalizar ni menos enumerar en una lista como ocurre con los dos primeros formatos de formalización de constructividad. Existe una infinita cantidad de pautas, al menos tantos como proyectos y contextos de trabajo. No obstante, no cualquier "estrategia" o recomendación más detallada que un principio representa una pauta de constructividad. Para que pueda ser reconocida como tal es necesario que primero cumpla, al menos con 6 condiciones importantes de forma y fondo:

La primera condición es que el contenido principal de una pauta de constructividad sea una decisión de diseño, directamente. Esto es sustancialmente diferente a los formatos anteriores. Un factor se refiere a un aspecto de construcción a considerar durante el diseño y un principio se refiere a una tendencia o idea general que se puede aplicar durante la toma de decisiones. Una pauta se refiere a la decisión de diseño en sí, sin análisis o elaboración previa necesaria.

La segunda condición es que la pauta se refiera a "una" decisión de diseño, puntualmente; no a "varias" decisiones de diseño, "cualquier" decisión de diseño o a "toda" decisión de diseño. Las pautas, lejos de ser universales, son específicas, precisas, sin posibilidad de generalización o transferencia. Factores y principios son, en cambio, de aplicación global y válidos en la gran mayoría de las situaciones de proyecto.

La tercera condición es que la pauta señale concretamente una dirección específica hacia dónde orientar la decisión de diseño, sin mayor interpretación que la contextualización del problema. Es, por definición, una aplicación práctica. La pauta es prescriptiva directa, explícita en cuanto a indicar la dirección de la decisión.

La cuarta condición es que la pauta tenga un contexto de aplicación definido y claramente determinado. Dada su especificidad, sólo se pueden seguir en problemas de diseño determinados. En caso contrario, se convierten en estrategias que no se sabe cuando utilizar.

La quinta condición es que la pauta sea ejecutable, observable y medible. Para cada pauta debe ser posible identificar uno o más indicadores cuantitativos o cualitativos que permitan evaluar su aplicación, cumplimiento y resultado.

La sexta condición es que la pauta debe señalar la razón o explicación de la orientación recomendada, a fin de que sea posible de evaluar por el diseñador en el contexto o problema de diseño. Por definición, la explicación hará referencia a un factor o principio de constructividad aplicado en el contexto específico.

Por ejemplo, una pauta correctamente formulada es la siguiente:

*“En terrenos congestionadas, de poco espacio libre, o complejos en su forma, dividir el proyecto en fases con independencia constructiva para facilitar los acopios de materiales, transporte de personal, aumentar espacio de trabajo y, en general, aumentar la accesibilidad interna.”*

Análisis de cumplimiento de condiciones:

- 1) Se refiere a la decisión de división del proyecto en partes independientes.
- 2) Es específico en cuanto a la segmentación constructiva. Por ejemplo, no se refiere a autonomía volumétrica, expresiva o de otro tipo.
- 3) Señala la división del diseño como tendencia correcta.
- 4) Es aplicable en contextos con terrenos congestionados o complicados.
- 5) Indicadores posibles: cantidad de espacio libre y vías de acceso despejadas que se crean en cada fase.
- 6) El objetivo es aumentar la accesibilidad interna y facilitar los acopios de materiales.

#### 4.5. Reglas de Constructividad

Las reglas son indicaciones concretas que restringen directa y explícitamente una decisión de diseño, de la manera más específica posible, incluso en términos cuantitativos. Sólo son aplicables a los problemas de diseño con las mismas condiciones exactas en que fueron definidas, por lo que son altamente variables incluso dentro de un mismo proyecto o equipo.

Formalmente, las reglas representan una versión más específica y detallada de una pauta, por lo que en términos generales comparten sus mismos criterios de estructura. La principal diferencia que una regla debe dejar muy poco o nulo espacio para evaluación o interpretación por del diseñador. Literalmente, es una regla.

Dada su alta especificidad, las reglas son poco comunes en el trabajo ordinario de diseño y arquitectura. Sólo aparecen para regular aspectos puntuales dentro de grupos de trabajo o de práctica, como oficinas de arquitectura o equipos de diseño-constructor. Usualmente normalizan aspectos específicos aislados, como optimizaciones de diseño aprendidas de experiencias exitosas anteriores, o restricciones puntuales dadas por las características especiales de un grupo específico de trabajo. Por ejemplo, dentro de una empresa inmobiliaria la división de arquitectura podría normalizar su diseño de barandas metálicas para balcones en su forma y materiales siguiendo las recomendaciones de facilidad de soldadura en obra dadas por la división de construcción.

Las reglas de constructividad son tradicionales en el campo del diseño de ingeniería más que el arquitectónico. Por ejemplo, las reglas usuales de distancias mínimas entre enfierraduras obedecen no sólo a consideraciones estructurales, sino además a los requisitos dimensionales de las sondas vibratoras del hormigón.

## **5. CONCLUSIONES**

Esta investigación plantea un sistema de organización del conocimiento de constructividad que permite ordenar la información de acuerdo a las necesidades del arquitecto a lo largo del proceso de diseño de una manera sintética, práctica y sistemática.

Las pruebas iniciales demostraron que el sistema es comprensible, manejable y aplicable por los arquitectos, tanto en el contexto académico como profesional. Asimismo, el modelo ha demostrado ser de utilidad como instrumento pedagógico en la enseñanza de contenidos técnicos de construcción a estudiantes de arquitectura. El modelo ha sido utilizado como guía de trabajo en estudiante durante prácticas profesionales en construcción y seguimientos de obra, así como pautas para el análisis de proyectos.

Futuros estudios se orientan hacia la implementación práctica del modelo en el ambiente profesional y la medición de la utilidad del modelo en cuanto a eficiencias de construcción obtenidas.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos el aporte del proyecto FAU-UCH 008/2008 que financió esta investigación, y que concluyó en la publicación del libro de los mismos autores, "*Constructividad y Arquitectura*", Ediciones Universidad de Chile, Santiago, 2010.

## REFERENCIAS

- Adams, S. (1990). *Constructividad*. Barcelona: Ediciones CEAC.
- Boeke, E. (1990). *Design for Constructability: a Contractor's View*. Concrete Construction, 35 (2), 198-202.
- Building and Construction Authority [BCA]. (2005). *The Code of Practice of Buildable Design*. Singapur: Building and Construction Authority.
- Construction Industry Institute Australia [CIIA]. (1992). *Constructability Principles File*. Brisbane: Construction Industry Institute Australia.
- Construction Industry Institute [CII]. (1986). *Constructability: A Primer*. Austin: Construction Industry Institute, University of Texas.
- Construction Industry Institute [CII]. (1987). *Constructability Concept File*. Austin: Construction Industry Institute, University of Texas.
- Construction Industry Research and Information Association [CIRIA]. (1983). *Buildability: An Assessment*. Londres: CIRIA.
- Crowther, P. (2002). *Design for Buildability and the Deconstruction Consequences*. Karlsruhe, Germany: CIB Task Group 39.
- Chen, S. y McGeorge, W. (1994). *A Systems Approach to Managing Buildability*. Australian Institute of Building Papers, 5, 75-86.
- De Vries, B. y Harink, J. (2005). *Construction Analysis during the Design Process*. En: Proceedings of the 11th International CAAD Futures Conference Computer Aided Architectural Design Futures, University of Technology, Vienna, Austria, Junio 20-22.
- Ferguson, I. (1989). *Buildability in Practice*. Londres: Mitchell Publishing.
- Fischer, M. (2006). *Formalizing Construction Knowledge for Concurrent Performance-Based Design*. En.: 13th EG-ICE Workshop 2006 "Intelligent Computing in Engineering and Architecture", Ascona, Suiza, Junio 25-30.
- Fischer, M. y Tatum, C. (1997). *Characteristics of Design-Relevant Constructability Knowledge*. Journal of Construction Engineering and Management, 123 (3), 253-260.
- Formoso, C.; Tzotzopoulos, P.; Jobim, M. y Liedtke, R. (1998). *Developing a Protocol for Managing the Design Process in the Building Industry*. En: Proceedings Sixth Annual Conference of the International Group for Lean Construction IGLC-6, Guarujá, Brazil.
- Griffith, A. y Sidwell, A. (1997). *Development of Constructability Concepts, Principles and Practices*. Engineering, Construction and Architectural Management, 4 (4), 295-310.

- Glavinich, T. (1995). *Improving Constructability during Design Phase*. Journal of Architectural Engineering, 1 (2), 73-76.
- Hanlon, E. y Sanvido, V. (1995). *Constructability Information Classification Scheme*. Journal of Construction Engineering and Management, 121 (4), 337-345.
- Hanna, A. y Sanvido, V. (1990). *Interactive Vertical Formwork Selection System*. Concrete International, 12 (4), 26-32.
- Hassan, S. (2005). *Design Phase Constructability Concepts in Highway Projects*. Skudai: Universiti Teknologi Malaysia.
- Lam, P.; Wong, F. y Chan, A. (2006). *Contributions of Designers to Improving Buildability and Constructability*. Design Studies, 27, 457-479.
- O'Connor, J.; Rusch, S. y Schultz, M. (1987). *Constructability Concepts for Engineering and Procurement*. Journal of Construction Engineering and Management, 113 (2), 235-247.
- Pulaski, M. y Horman, M. (2005). *Organizing Constructability Knowledge for Design*. Journal of Construction Engineering and Management, 131 (8), 911-919.
- Tatum, C.; Vanegas, J. y Williams, J. (1986). *Constructability Improvement Using Prefabrication, Preassembly, and Modularization*. Tech. Rep. No 297, Department of Civil Engineering, Stanford: Stanford University.
- Thabet, W. (1999). *Design-Construction Integration through Virtual Construction for Improved Constructability*. Stanford: Berkeley-Stanford CE&M Workshop.
- Touran, A. (1988). *Concrete Formwork: Constructability and Difficulties*. Civil Engineering Practice, 3 (2), 81-88.
- Vanegas, J.; Tatum, C. y Colarelli, V. (1988). *A Structure for Construction Input During Preliminary Design*. Stanford: Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) Stanford University.
- Wong, F.; Lam, P.; Chan, A. y Chan, E. (2006a). *A Review of Buildability Performance in Hong Kong and Strategies for Improvement*. Surveying and Built Environment. 17 (2), 37-48.
- Wong, F.; Lam, P.; Chan, E. y Wong, K. (2006b). *Factors Affecting Buildability of Building Designs*. Canadian Journal of Civil Engineering, 33 (7), 795-806.
- Woon, K. (2006). *Integrating Constructability Into Design Process*. MSc Thesis, Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia.
- Wright, E. (1994). *Constructability Guide*. O'Brien-Kreitzberg Assoc Inc.