

6. Estructura de Conocimiento de Constructividad (ECC)

§ 6.1. Descripción general de la Estructura de Conocimiento de Constructividad (ECC)

La Estructura de Conocimiento de Constructividad (ECC) es, como su nombre lo indica, un sistema de organización de conocimiento concebido con el objetivo principal de ordenar en forma sistemática, jerárquica, sintética, accesible y eficiente 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.

Sus fundamentos derivan directamente del MADC. Como punto de partida, toma el concepto de indicadores de dificultad como elementos básicos de análisis, y respetando la primera condición definida por el modelo, se concentra únicamente en aquellos que pueden ser afectados por el diseño. La ECC “filtra” las variables y restricciones de diseño y los agrupa en 10 categorías generales en la forma de factores. Igualmente, recoge los cuatro mecanismos fundamentales de reducción de dificultad que propone el MADC y los aplica en el contexto de diseño en la forma de principios. Formalmente, sigue la estratificación recomendada para la formalización del conocimiento revisada previamente en § 2.2.2., definiendo cuatro niveles diferenciados en nivel de especificidad, contexto de aplicación, dimensión de conocimiento y orientación de diseño, respondiendo a las diferentes necesidades de información y conocimiento del arquitecto a lo largo del proceso de diseño. La manera de formalizar el conocimiento también sigue los lineamientos definidos en la primera parte de este libro: es transversal a todas las escalas y etapas del proceso de diseño, progresivo en cuanto a grado de detalle, abstracción y prescripción, y dinámico para ajustarse a diferentes contextos de aplicación.

a. Factores

Los factores derivan directamente de los indicadores de dificultad que se manifiestan como variables o restricciones de proyecto, en la forma de indicador general de lo que debe ser considerado en las decisiones de diseño. Por lo tanto, no es prescriptivo y es aplicable en la amplia mayoría de las situaciones. 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. La ECC define 10 factores generales, divididos en tres tipos diferenciados según el nivel de relación con las condiciones de trabajo en obra y el grado de afectabilidad por equipo de proyecto: (1) factores internos a obra; (2) factores externos a obra; y (3) factores transversales:

- (1) *Factores internos a obra*: son aquellos que son propios de las condiciones de trabajo en obra y que son directamente afectables y afectables por el equipo de proyecto. Son factores internos:
 - *Mano de obra*, determinado por el conjunto de 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
 - *Procedimientos constructivos*, determinado por 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.
 - *Herramientas*, determinado por 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.
 - *Materiales*, determinado por 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.

- (2) *Factores externos a obra*: aquellos que son propios de las condiciones de trabajo en obra y que no son directamente afectables por el equipo de proyecto (con presunción de encargo). Son factores transversales:
 - *Clima*, determinado por 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.

- *Terreno*, determinado por 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.
 - *Accesibilidad*, determinado por 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.
 - *Tiempo*, determinado por la cantidad de tiempo que se requiera para realizar las tareas de construcción definidas por el proyecto.
- (3) *Factores transversales*: aquellos que son propios de las condiciones de trabajo del equipo de proyecto y no que se relacionan necesariamente con las condiciones de trabajo en obra. Son factores transversales:
- *Comunicación*, determinado por 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.
 - *Coordinación*, determinado por 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.

Los factores de constructividad representan la síntesis última de las variables y restricciones de diseño, concentradas en 10 categorías. Otros conceptos típicamente sindicados como “factores” son en realidad, derivaciones de estos factores generales; integraciones entre varios factores, o incluso errores conceptuales que no presentan influencia alguna. Entre otros, “tolerancias”, “detalles”, “seguridad en obra”, “costo”, o “calidad” han sido señalado como factores de constructividad (*vid. § 4 y ss.*).

Por ejemplo, se señala que la especificación de “tolerancias adecuadas” aumenta la facilidad de construcción. Sin duda alguna. Pero, (1) las tolerancias máximas son un componente del diseño (el diseñador las especifica), y por tanto, no podrían ser al mismo tiempo un factor que las afecte; y (2) la especificación de tolerancias “adecuadas” depende de su grado de correlación con las capacidades reales de los recursos productivos en obra (una tolerancia es adecuada cuando se puede alcanzar razonablemente con la mano de obra, la maquinaria, los materiales y otras condicionantes en el contexto del proyecto). Por ende “tolerancias” no es un factor adicional, sino que depende de los demás factores ya especificados. Un caso similar ocurre con “detalles”, que lejos de ser un factor, no es más que una etapa muy específica de diseño, y como tal, debe respetar los mismos factores de constructividad definidos.

“Seguridad en obra” es más cuestionable. El argumento es que obras con menos riesgos, son obras más fáciles de construir. Pero, ¿de qué depende la seguridad de una obra? y ¿hasta qué punto el diseño puede afectarla? Los factores de riesgo en una obra van desde localizarse en un barrio peligroso, en terrenos difíciles de cercar o con accesos incontrolables, con faenas o procedimientos constructivos inherentemente peligrosos, materiales tóxicos, problemas de supervisión y dirección de obra, hasta tener mano de obra de baja calidad o incapacitada. De hecho, sobre el 85% del total de siniestros en una obra, se debe a “acciones inseguras” por mano de obra, lo que va desde el simple descuido o la falta de elementos de protección personal, hasta el trabajo en condiciones de intemperancia (Solminihaç y Thenoux, 2000). De todas estas posibles causas, al menos la mitad corresponde exclusivamente al dominio de la administración de obra y no tiene relación con el diseño, así que no podría ser factor de constructividad. De la otra mitad, atribuible a “condiciones inseguras”, y que eventualmente podrían ser anticipados y reducidos desde el diseño, son todos clasificables en alguno de los factores listados, y por tanto, tampoco representan un factor adicional.

La calidad del producto es también frecuentemente mencionado como “factor” de constructividad. El argumento es que diseños con estándares de calidad muy altos son difíciles de construir. En primer lugar, existe un problema conceptual. Técnicamente, los estándares que un diseñador define para un objeto son “de desempeño”, y la “calidad” de ese objeto se refiere al grado de cumplimiento de esos estándares en relación a un criterio previamente definido, usualmente, las expectativas del cliente. Así, la calidad de un diseño arquitectónico está dada por el grado de cumplimiento de los criterios de desempeño (del edificio) esperados por el cliente y/o el usuario; la calidad de un proceso constructivo está dada por el grado de cumplimiento de los criterios de desempeño (del objeto construido). Hecha la aclaración conceptual, y asumiendo que en el fondo del asunto se trata de la idea de “estándares de desempeño”, estos no representan un factor de constructividad por las mismas dos razones esgrimidas para el caso de las tolerancias: (1) corresponden a una característica del diseño y por tanto no podrían al mismo tiempo constituir un factor que las afecte; y (2) la especificación de estándares de desempeño “correctos” depende del grado de correlación que tengan con las capacidades reales de los recursos productivos en obra, y por lo tanto, referencian los mismos factores ya definidos.

El costo ha sido también señalado como posible factor de constructividad: cuando los recursos económicos son restringidos, menos disponibilidad de recursos productivos, y por ende, obras más difíciles. Efectivamente, el costo (máximo) del proyecto es un factor de diseño, uno muy importante, pero es un factor transversal a todo el proyecto y no exclusivo de la etapa de construcción. Representa una condición que el diseño debe satisfacer, al igual que el programa arquitectónico, los criterios de desempeño energéticos o la normativa aplicable. En términos de construcción, el costo máximo determina los recursos productivos disponibles, los que sí representan factores de constructividad.

b. Principios:

Los principios de constructividad derivan directamente de los cuatro mecanismos básicos definidos por el MADC para reducir la dificultad de construcción. En realidad, representan la aplicación concreta y práctica dentro del contexto de diseño de los mecanismos teóricos propuestos por el modelo. Se definen como 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. 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.

La ECC define 4 principios fundamentales: (1) Principio de simplicidad de tareas de construcción, (2) Principio de reducción de tareas de construcción, (3) Principio de reducción de variabilidad de tareas de construcción y (4) Principio de flexibilidad de elección de tareas de construcción.

- (1) *Principio de simplicidad de tareas de construcción*: consiste en la preferencia de características de diseño que impliquen tareas de construcción con menor dificultad unitaria.
- (2) *Principio de reducción de tareas de construcción*: consiste en la preferencia de características de diseño que impliquen menor cantidad de tareas de construcción
- (3) *Principio de reducción de variabilidad de tareas de construcción*: consiste en la repetición de características de diseño que impliquen una misma o muy similar tarea de construcción, y en la homogeneización de características de diseño con mínima variación que impliquen diferentes tareas de construcción.
- (4) *Principio de flexibilidad de elección de tareas de construcción*: consiste en la preferencia de características de diseño que tengan más de una manera de construirse, con un mismo resultado final, y la posterior cesión al constructor de la elección de combinación de tareas de construcción que mejor se adapte a las condiciones de obra. Este principio está basado en la presunción de conocimiento experto.

c. Pautas

Las pautas derivan indirectamente del MADC, constituyendo aplicaciones prácticas de los principios de constructividad en un contexto específico. Son, por definición, ejecutables, observables y medibles; prescriptivas en forma directa y sólo aplicables a los problemas de diseño que comparten el mismo contexto en el fue definida. Las pautas no son universales y por tanto no se pueden sistematizar de manera igual que los factores o principios. Por tal razón, no son individualizadas en la ECC, sino sólo caracterizadas. Específicamente, se entregan recomendaciones generales para la definición de pautas de constructividad efectivas.

d. Reglas

Las reglas son indicaciones concretas que restringen directa y explícitamente una decisión de diseño, incluso en términos cuantitativos, siendo de naturaleza prescriptiva en el nivel más específico posible. Sólo son aplicables a los problemas de diseño que comparten las mismas características específicas del contexto en que fueron definidas y por lo tanto tampoco son individualizadas dentro de la ECC.

<i>FACTORES</i>	<i>Factores internos</i>	<i>Mano de obra Procedimientos constructivos Herramientas Materiales</i>
	<i>Factores externos</i>	<i>Clima Terreno Accesibilidad Tiempo</i>
	<i>Factores transversales</i>	<i>Comunicación Coordinación</i>
<i>PRINCIPIOS</i>		<i>Principio de simplicidad de tareas Principio de reducción de tareas Principio de flexibilidad de elección de tareas Principio de reducción de variabilidad de tareas</i>

Cuadro 14:
Factores
y principios de
constructividad

§ 6.2. Factores de la constructividad

72

§ 6.2.1. Factores internos a obra

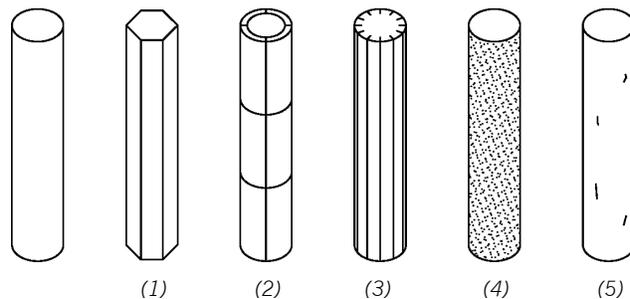
a. Mano de obra

El grado de constructividad de un diseño está determinado por 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. Diseños con mayores niveles de constructividad son aquellos que requieren equipos de trabajo que se corresponden con los disponibles más fácilmente en las condiciones del proyecto.

En relación a la consideración de este factor, el análisis de constructividad se puede realizar en dos ámbitos distintos: (1) *características propias* de la mano de obra requerida; y (2) *disponibilidad* de la mano de obra requerida.

El primer ámbito de consideración de este factor tiene relación con las *características propias* de la mano de obra requerida. A igualdad de condiciones, diseños muy específicos que exijan mano de obra especializada, que sean desconocidos para la mano de obra disponible, que requieran una gran cantidad de trabajadores, que necesiten mayor supervisión técnica, que exijan acciones que pongan al límite las capacidades físicas de los trabajadores, que requieran sesiones de capacitación o instrucción adicional, entre otras características, tienen menor grado de constructividad.

Figura 22:
Ejemplo de sustitución
de terminación en pilar
curvo para eliminar
estucado manual



Por ejemplo, estucar un pilar curvo es una tarea de construcción que es de alta dificultad y que requiere mano de obra con habilidad técnica superior, la que es cara y escasa. Además, requiere la confección de regletas de madera o metal, lo que involucra tiempo adicional, y por supuesto, mayor costo. Aún así, la terminación no es nunca perfecta y por lo general requiere de retoques y pulidos posteriores. A fin de aumentar el grado de constructividad, el diseño podría, entre otros: (1) cambiar

la curvatura a una geometría faceteada; (2) mantener la curva y especificar otro material de terminación a base de paneles sobrepuestos que permitan ajustar y absorber las diferencias de curvatura; (3) diseñar una serie de canterías regladas perpendiculares a la curvatura que faciliten el trabajo y escondan las imperfecciones; (4) especificar terminación final a base de pintura granulada u otra con textura que permitan disimular diferencias de terminación, (5) plantear hormigón a la vista especificando moldajes curvos industrializados y hormigón con alta docilidad; etc. (figura 22).

Un caso ejemplificador del impacto de la mano de obra en la constructividad de los diseños se da en los proyectos con estructura metálica. La soldadura de uniones es una tarea crítica en obra, pues en su ejecución sin falla se basan todos los cálculos estructurales que asumen continuidad de material. Sin embargo, es una tarea difícil que requiere mano de obra especializada —por lo general certificada— y minuciosa supervisión técnica, lo que aumenta el nivel de dificultad total de construcción. Uniones apernadas, son por lo general, más fáciles de ejecutar y controlar, y por tanto, de mayor grado de constructividad (figura 23).

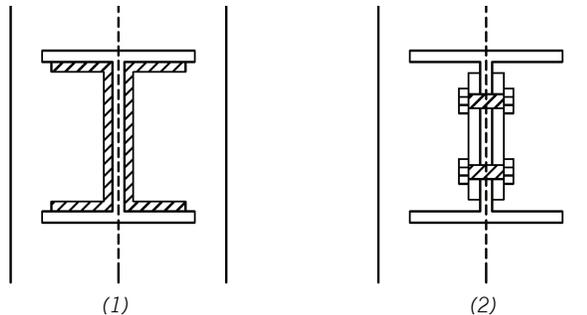


Figura 23:
Ejemplo de cambio de
tipo de unión de
estructura metálica

Otra dimensión de este mismo ámbito de consideración ocurre con las características *sociales* o *culturales* de la mano de obra. Cuando el diseño no considera ni responde a las condiciones y códigos culturales, educacionales o sociales, se crean escenarios de trabajo estresantes y difíciles de administrar. Por ejemplo, existen gigantescas diferencias culturales entre trabajadores de industria (e.g. de prefabricación) y obreros de terreno. Por lo general, los primeros son más prolijos, cuidadosos y con mayor preocupación por la calidad del producto y del proceso; y los segundos más flexibles, enérgicos y dispuestos a trabajar en condiciones difíciles.

El segundo ámbito de consideración de este factor tiene relación con la *disponibilidad* de la mano de obra necesaria en el contexto del proyecto. A igualdad de condiciones, diseños que exijan mano de obra que no es fácil de obtener localmente en el contexto del proyecto, que obligan traslado de personal o que implican mano de obra que —aunque existente— no está fácilmente disponible debido a limitantes económicas o legales, tienen menor grado de constructividad.

Por ejemplo, a fin de aumentar el grado de constructividad de un proyecto que deba ser realizado en una zona extrema del país con mano de obra local sin experiencia en construcción, el diseño podría, entre otros: (1) plantear un sistema constructivo modulado con muy baja variabilidad para que las tareas en obra sean repetitivas y de más rápido aprendizaje, (2) presentar detalles que consideren tolerancias aceptables mayores a los estándares normales, (3) minimizar la cantidad de componentes y elementos en obra, (4) reducir el número de tareas de construcción *in situ* planteando un sistema prefabricando de fácil montaje, etc.

El análisis de disponibilidad local no sólo debe entenderse como una limitante, sino también como un potencial. Por ejemplo, normalmente los trabajadores se desempeñan mejor con aquellos materiales y sistemas que son propios de la zona. Más aún, la experiencia acumulada permite obtener resultados de diseños imposibles en otro lugar con otra mano de obra. El diseño puede sacar partido de esta situación, planteando soluciones que, aunque complejas para un contexto promedio, son de alta constructividad en esa situación en específico. Otro ejemplo es el que ocurre con proyectos en zonas con bajo desarrollo y mano de obra local económica. Aquí, los diseños pueden plantear soluciones que involucren un alto componente de trabajo manual intensivo, con mucho personal desarrollando tareas simples, lo que, por ejemplo, permitiría obtener resultados con características de trabajo de artesanía, absolutamente prohibitivos en otros lugares.

La disponibilidad también se refiere a las *restricciones económicas o legales* del proyecto. Muchas veces la mano de obra necesaria para las tareas de construcción existe y está disponible físicamente en la zona, pero existen limitantes económicas o legales de contratación que restringen su disponibilidad real para el proyecto. Un diseño que considere este factor puede responder con soluciones que involucren un mayor nivel de mecanización y pre-montaje, reduciendo la cantidad de mano de obra en terreno.

Por último, es importante precisar que la consideración de la mano de obra no solo se refiere a las características del grupo obrero, sino también al equipo profesional en terreno. Aparte de los tradicionales profesionales constructores y administradores de obra, ciertas soluciones de diseño implican la participación de profesionales y técnicos especiales. Por ejemplo, proyectos con geometrías complejas y/o muy sensibles a las tolerancias requieren de topógrafos en forma constante en terreno que revisen constantemente niveles y ejes con equipos digitales o geo-referenciados. En otras ocasiones, las soluciones de diseño más complejas requieren de equipos profesionales con mayor preparación y experiencia, pues el riesgo de error es alto. En todas estas situaciones la incorporación de recursos humanos altamente capacitados representa un factor de complejidad adicional a las tareas en obra y podría ser evitado con diseños más ajustados a las capacidades típicas de los grupos humanos disponibles en el contexto del proyecto.

b. Procedimientos constructivos

El grado de constructividad de un diseño está determinado por la cantidad, variabilidad, complejidad de realización, riesgo asociado e interrelación entre los diferentes procedimientos constructivos necesarios para la realización de las tareas de construcción definidas por el proyecto. Diseños con mayores grados de constructividad son aquellos que requieren procedimientos constructivos que pueden ser llevados a cabo más fácilmente en las condiciones del proyecto.

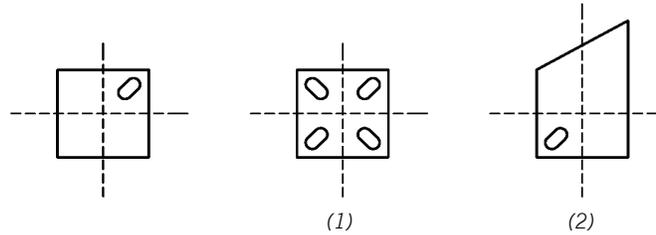
En relación a la consideración de este factor, el análisis de constructividad se puede realizar en dos ámbitos distintos: (1) *características propias* de los procedimientos constructivos requeridos y (2) *orden secuencial e interrelación* de los diferentes procedimientos constructivos requeridos.

El primer ámbito de consideración de este factor tiene relación con las *características propias* de los procedimientos constructivos requeridos. A igualdad de condiciones, diseños que impliquen procesos con mayores probabilidades de error, que exijan procedimientos desconocidos para el equipo constructor, que requieran muchos pasos o etapas, que requieran de muchas tareas con acciones secundarias o auxiliares (*vid. § 5.1.1.a*), que varíen durante el transcurso de la obra, que requieran mayores esfuerzos de coordinación y programación en obra, que requieran ensayos o pruebas, que necesiten habilidades específicas por parte de los trabajadores, o que sean faenas riesgosas con mayores necesidades de medidas de seguridad, entre otras características, tienen menor grado de constructividad.

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.

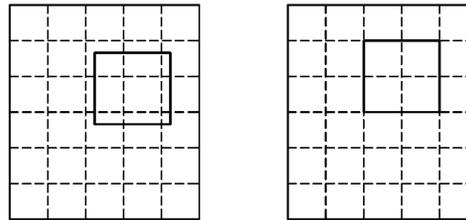
Una estrategia frecuente para enfrentar problemas de constructividad por procedimientos constructivos es definir un cierto grado de prefabricación, lo que reduce la cantidad de tareas en obra, aunque agrega consideraciones de constructividad por procedimiento constructivo dentro de la industria, por transporte de elementos y por ulterior procedimiento de montaje en obra. Por ejemplo, un diseño prefabricado, a fin de reducir probabilidades de error durante el montaje, podría, o bien (1) plantear componentes simétricos cuya orientación sea irrelevante en el montaje; o por el contrario, (2) plantear componentes cuyos diseños sólo permitan la instalación en una sola posición, descartando el montaje incorrecto (figura 24).

Figura 24:
Ejemplo de cambio de
diseño de componente
para facilitar montaje



Otra dimensión de análisis de constructividad por procedimiento constructivo está en la *cantidad de acciones secundarias o auxiliares* requeridas para cumplir la tarea (son secundarias aquellas tareas necesarias para el desarrollo de las acciones directas y que no pertenecen al producto final, tales como limpiar, montar andamiajes, proteger pavimentos, etc., *vid.* § 5.2.1.a.). Por ejemplo, faenas de construcción de muros de albañilería o instalación de paneles de revestimiento pueden ser notablemente reducidas en su dificultad unitaria con estudios de modularización de diseño. Esto no sólo reduce las tareas de corte y ajuste de módulos (ladrillos, planchas, cerámicas, etc.) y sus acciones secundarias (crear plantillas, limpiar residuos, etc.), sino que también asegura mejor calidad de terminación y menor pérdida de material.

Figura 25:
Ejemplo de
modularización del
diseño



El segundo ámbito de consideración de este factor se refiere a la atención del *orden secuencial* de las distintas tareas de construcción. A igualdad de condiciones, soluciones que demanden procedimientos que impidan el desarrollo de trabajos en paralelo, que generen daño en partidas por trabajos subsecuentes, o que obliguen a que las faenas más complejas o que demandan mayor precisión sean desarrolladas en ambientes poco controlados, tienen menor grado de constructividad. Aunque por lo general esto es parte de la programación de obra, y por tanto, de las tareas de la planificación de construcción, a veces un cierto orden está forzado por el diseño. Por ejemplo, una celosía metálica que tenga puntos de anclaje embudidos en pilares de hormigón arquitectónico 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 prácticamente similar podría plantear, entre otros: (1) 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), (2) una diferente subestructura metálica sobrepuesta al pilar de hormigón, (3) la utilización de martillos de disparo para la realizar la conexión posterior, etc. (figura 26).

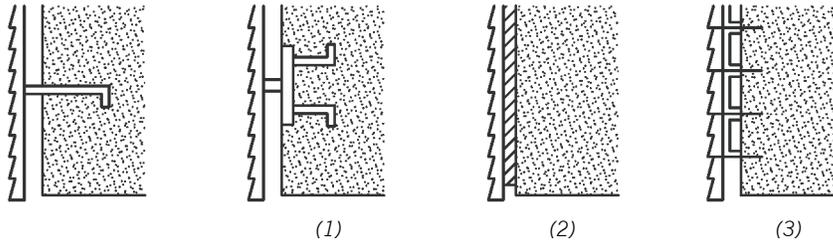


Figura 26:
Ejemplo de cambio de tipo
de soporte de celosía
exterior

Frecuentemente este tipo de dificultades de orden de procedimiento constructivo se esconden en detalles “aparentemente” menores. Por ejemplo, en un piso de madera con guardapolvo encastrado a tope y continuidad de plomo con un muro con terminación de yeso obliga a enyesar primero, dejando el espacio exacto durante el enyesado para luego encajar el guardapolvo; o bien instalar los guardapolvos primero, protegerlos y luego enyesar y pintar; ambos procedimientos difíciles de ejecutar en obra y que posiblemente terminen en resultados insatisfactorios. A fin de aumentar el grado de constructividad, el diseño podría, entre otros: (1) plantear un guardapolvo sobrepuesto, (2) mantener el guardapolvo a plomo pero usar una moldura más pequeña y ocultar la separación de ajuste con un rodón, (3) plantear un guardapolvo a plomo pero con cantería superior, (4) cambiar la terminación del muro, etc.

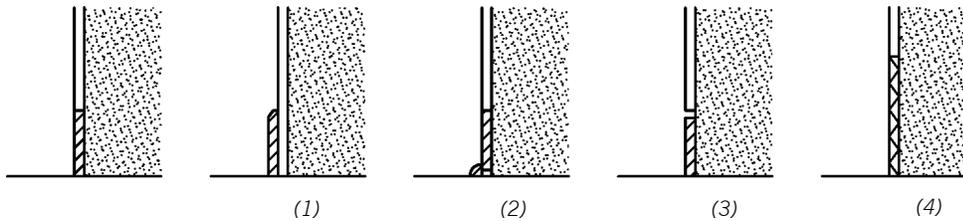


Figura 27:
Ejemplo de cambio de
detalle de guardapolvo

c. Herramientas

El grado de constructividad de un diseño está determinado por 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. Diseños con mayores grados de constructividad son aquellos que requieren herramientas, equipos y maquinarias que se corresponden con los disponibles más fácilmente en las condiciones del proyecto y que permiten ser utilizadas de un modo eficiente y óptimo en obra.

En relación a la consideración de este factor, el análisis de constructividad se puede realizar en dos ámbitos distintos: (1) *requisitos* de las herramientas en cuanto *obligaciones* de diseño; y (2) *capacidades* de las herramientas en cuanto *eficiencias* de diseño.

El primer ámbito se refiere a los *requisitos* de las herramientas, equipos y maquinarias (HEM). A igualdad de condiciones, diseños que no consideren las necesidades directas o indirectas de las HEM y que generen limitaciones de uso, complicaciones por falta de energía o suministros, mayor cantidad de tareas auxiliares, modificación de secuencias constructivas, o en general, que especifiquen tareas de construcción que requieren herramientas, equipos y maquinarias que no pueden ser utilizadas con facilidad en el contexto del proyecto tienen menor grado de constructividad.

Por ejemplo, las grúas torre o de pluma son extensamente utilizadas en la construcción de edificaciones en altura que requieren transporte vertical de materiales pesados. Dos situaciones difíciles en obra con estos equipos son la instalación (montaje) y estabilización (anclaje). Primero, la instalación se realiza con grúas accesorias usualmente desde la vía pública; lo que es relativamente fácil para el montaje cuando el terreno está vacío, pero particularmente difícil en el desmontaje cuando el edificio ya está construido. Segundo, las grúas fijas requieren en su base de un lastre de estabilidad para evitar el volcamiento, el cual crece en peso con la altura de la torre, extensión de la pluma y cargas de uso. En escenarios de mayor exigencia, la base de la torre debe ser empotrada en una zapata en el terreno y el mástil debe ser apuntalado a lo largo de su extensión. Ante esta situación, a fin de aumentar el grado de constructividad, el diseño podría, entre otros: (1) calcular la posición óptima de localización de la torre a partir de su radio de giro, procurando que quede de la forma más accesible posible desde el exterior y vía pública (para el monte y desmonte de la estructura), (2) si debe quedar al interior de la construcción y no puede coincidir con un vacío longitudinal (como vacío de ascensor), plantear losas independientes de estructura en ese punto de manera que puedan ser construidas posteriormente; (3) asegurar el acceso a la base de la grúa con maquinaria pesada para la instalación de lastres de estabilidad; (4) cuando sea necesario, permitir la construcción de zapatas de fundación que no entorpezcan con canalizaciones u otras faenas en el terreno y eventualmente, que no requieran ser demolidas, etc.

En la misma línea, las HEM de menor tamaño deben también ser considerados en cuanto a sus requerimientos de uso, en especial lo referido a disponibilidad de insumos y suministros, condiciones de uso y necesidad de energías. Por ejemplo, sistemas a base de aire comprimido, flujo constante de gas o agua a presión, requieren —evidentemente— de estos suministros para funcionar, los que no siempre pueden ser asumidos como disponibles (e.g., en contextos de trabajo en altura o rurales); otros diseños pueden exigir instrumentos y herramientas de precisión (e.g. niveles y sensores geo-referenciados, distanciómetros o niveles láser, clisímetros o clinómetros digitales etc.). que no se encuentran disponibles en todos los contextos de proyecto.

El segundo ámbito de consideración se refiere a las *capacidades de trabajo y uso* de las herramientas, equipos y maquinarias disponibles. A igualdad de condiciones, diseños que obligan a que las herramientas sean utilizadas bajo su umbral óptimo de rendimiento o capacidad, que generan tiempos ociosos de uso, que limitan el potencial máximo de trabajo, o que dificultan su uso en terreno tienen menor grado de constructividad.

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 las HEM disponibles en el mercado. Con todo lo demás constante, un diseño con alto grado de constructividad por este factor sería aquel que respeta los diámetros de moldajes industriales existentes comercialmente en el contexto del proyecto y que permite que los pilares sean fabricados utilizando encofrados metálicos, resistentes y seguros. 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 moldajes especiales, probablemente con madera, lo que es una faena adicional y con mayor probabilidad de error e incumplimiento de tolerancias.

Un diseño de bajo grado de constructividad sería aquel que obligue la utilización de cierto tipo de HEM sin tomar en cuenta las condiciones óptimas de uso. Por ejemplo, especificar hormigón de alta docilidad o bombeado en una obra de pequeño tamaño que sólo cuenta con betoneras y trompos mecánicos disminuye su grado de constructividad, pues obliga a faenas de dosificación precisa o contratación de hormigón premezclado y bombas industriales, de alto costo.

Por último, otra dimensión del análisis de disponibilidad corresponde a *factores externos de trabajo*, tales como condiciones ambientales de uso (temperatura, humedad) o espacio necesario. Por ejemplo, en un proyecto de remodelación de un hospital en uso, a fin de evitar los problemas y reclamos que sufriría la administración de obra al usar HEM ruidosas propias del hormigón armado (i.e. martillo neumático, sondas vibradores, etc.), el diseño podría entre otros, (1) especificar hormigones que reduzcan la necesidad de estas herramientas (e.g. hormigón autocompactante), (2) utilizar sistemas de hormigón prefabricado que disminuyan las faenas *in situ* (e.g. sistemas *tilt-up*), (3) utilizar estructuras prefabricadas a base de elementos en acero, etc.

d. *Materiales*

El grado de constructividad de un diseño está determinado por las características físicas, mecánicas, y tecnológicas de los materiales, productos, artefactos, insumos y materias primas sobre los cuales se ejecutan las acciones necesarias para la realización de las tareas de construcción definidas por el proyecto. Diseños con mayores grados de constructividad son aquellos que contemplan materiales que pueden ser obtenidos y manipulados con mayor facilidad en las condiciones del proyecto.

En relación a la consideración de este factor, el análisis de constructividad se puede realizar en dos ámbitos distintos: (1) *características propias* y (2) *disponibilidad* de los materiales requeridos.

El primer ámbito de consideración de este factor tiene relación con las *características propias* de los materiales requeridos. Estas pueden ser características físicas (tales como conductividad térmica, eléctrica, resistencia a la corrosión química, solubilidad, etc.), mecánicas (tales como resistencia a la compresión o tracción, dureza, elasticidad, etc.) o tecnológicas (tales como la capacidad de ser cortado, doblado, pegado, clavado, etc.). A igualdad de condiciones, diseños 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.

Por ejemplo, los revestimientos de muros a base de paneles de materiales pétreos (e.g. mármol) implican tareas de construcción de alta dificultad. Se trata de materiales por lo general frágiles, que se quiebran o rayan con facilidad; que se manchan cuando son porosos y que 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 esto, 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.

Dentro de la misma dimensión de características propias de los materiales, se incluye el análisis de requisitos de *transporte y condiciones de almacenamiento*. A igualdad de condiciones, la especificación de materiales que exijan transporte pesado (e.g. prefabricados de hormigón), peligroso

(e.g. ácidos), que sean de grandes dimensiones (e.g. elementos de madera laminada), que requieran ser almacenados en forma independiente (e.g. químicos), que necesiten hermeticidad (e.g. partículas volátiles, hidrosensibles), que sean extremadamente frágiles (e.g. cristales de grandes dimensiones), que caduquen rápidamente (e.g. tinturas químicas), o que sean de condición inestable (e.g. materiales vegetales), disminuye el grado de constructividad.

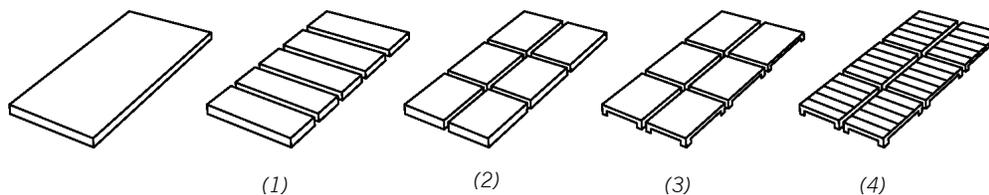


Figura 28:
Ejemplo de cambio de modulación en panel pétreo para hacerlo más manejable

Un caso especialmente complejo lo constituyen los *materiales tóxicos o de operación riesgosa*. Materiales que sean peligrosos durante su almacenamiento, transporte y manipulación, o que requieran faenas riesgosas para su manipulación aumentan considerablemente el nivel de dificultad de construcción. Por ejemplo, la instalación de alfombras cubrepisos requiere en ocasiones del uso de adhesivos que emiten gases tóxicos, por lo que se requiere de espacios bastante ventilados durante su utilización. Diseños de subterráneo o salas mediterráneas que contemplen este tipo de revestimiento de piso representan complicaciones en obra, pues requieren de la instalación de ventilación mecánica durante la instalación. Otros casos similares ocurren con otros materiales conflictivos, tales como aquellos derivados del asbesto, adhesivos con tolueno, pinturas con plomo, preservantes como creosota y pentaclorofenol, espumas aislantes con emisiones de formaldehído, o barnices con solventes a base de hidrocarburos.

El segundo gran ámbito de consideración tiene relación con la *disponibilidad* de los materiales en el contexto de la obra y con la *coordinación* entre ellos. Al igual como ocurre con los factores de mano de obra y de herramientas, la dificultad de construcción de un proyecto puede verse notoriamente incrementada si su diseño no considera la disponibilidad de los materiales, productos, insumos y materias primas requeridas en el contexto del proyecto. A igualdad de condiciones, diseños que consideran materiales que no existen en el lugar del proyecto o que requieren transporte desde otro lugar, que tienen complicados procesos de distribución, que son difíciles de reponer o que tienen producción limitada, que son escasos o únicos, que tengan limitantes sanitarias o legales para su adquisición o que sean desconocidos y/o especiales, entre otros, tienen menor grado de constructividad.

Por ejemplo, la construcción con madera sigue los mismos principios básicos en todos los lugares; sin embargo, existen innumerables pequeñas diferencias que surgen a partir del tipo de madera que se utiliza. Diferencias en las especies (y sus propiedades naturales, como color, veta, dureza, etc.),

dimensiones comerciales, grados de calidad, preservación y humedad, niveles de elaboración y disponibilidad de subproductos son algunos de los principales factores que modifican los procesos en obra. El transporte de madera de un cierto tipo desde un lugar a otro como medida de solución a la falta de disponibilidad local tampoco es una tarea fácil: la madera mantiene la humedad de equilibrio de su zona, y cambios bruscos en ella pueden terminar en torceduras o rajaduras. Como material vivo, demasiada exposición al sol, viento, lluvia u otras condiciones ambientales alteran sus propiedades. Diseños con mayores grados de constructividad son aquellos que utilizan tipos y productos de madera (dimensionada, elaborada, preservada, etc.) que son propios y están disponibles comercialmente en el contexto de proyecto. Además, por lo general, el trabajo carpintero es de mucha mejor calidad cuando los trabajadores utilizan maderas a las que están acostumbrados y son conocedores de su comportamiento (rajadura de veta, corte, dureza, ensanche, etc.)

Otra dimensión de análisis de disponibilidad de materiales también incluye las condiciones de *reposición y sustitución*, especialmente con productos partes y piezas. Por ejemplo, la cubicación exacta de cerámicas es una faena siempre complicada, pues no sólo depende de la superficie efectiva de revestimiento necesario, sino además de la geometría y posición de artefactos (pérdida por corte de ajuste), del formato, espesor y calidad de la cerámica (pérdidas por manipulación o almacenamiento) y de la calidad del maestro ceramista. Un diseño que especifique cerámicas especiales para un tipo de baño, ya sea por su nivel de exclusividad o porque se encuentran disponibles sólo en un proveedor lejano, obliga al equipo constructor a (1) comprar más cerámicas de las estrictamente necesarias a fin de suplir la incertidumbre del porcentaje de pérdida; o (2) ir comprando cerámicas según vaya avanzando la obra. Ambas situaciones aumentan la dificultad de construcción, ya sea por el mayor costo y problemas de almacenamiento o por la necesidad de mantener activa la cadena de suministro a tiempo exacto.

Por último, la revisión de este factor también incluye la consideración de la cantidad, complejidad o dificultad de las *tareas secundarias o auxiliares* que se requieren para la utilización de los distintos materiales. Por ejemplo, el hormigón coloreado es un material que, aunque industrializado y sujeto a estrictos controles de calidad, es de alta variabilidad y cuyo resultado final depende de muchos factores, usualmente externos. Para tener un cierto grado de control de comportamiento, es necesario realizar bastantes ensayos en obra para poder definir la composición exacta que otorga el color requerido; y desde ese momento, el trabajo de hormigonado debe realizarse bajo estrictas condiciones ambientales y de trabajo. Un diseño que deban contemplar este material, a fin de aumentar sus grados de constructividad podría, entre otros: (1) especificar colores con menores umbrales de variación, (2) especificar texturas que permitan disimular variaciones de tonos a través de pequeñas sombras, (3) utilizar la variación tonal como parte del diseño (e.g. mosaico), (4) y por supuesto, reemplazar el coloreado por tratamientos de tinturas superficiales, que, en todo caso, también pueden ser a base de productos cementicios.

§ 6.2.2. Factores externos a obra

a. Clima

83

El grado de constructividad de un diseño está determinado por 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. Diseños con mayores grados de constructividad son aquellos que involucran tareas de construcción que se pueden desarrollar más fácilmente en las condiciones climáticas y atmosféricas más probables de tener en el contexto del proyecto.

En relación a la consideración de este factor, en el análisis de constructividad se debe distinguir entre dos condiciones diferentes: (1) diseños que deben realizarse en zonas con *condiciones climáticas agresivas o extremas*, (2) en zonas con *condiciones climáticas moderadas* o con *condiciones atmosféricas cambiantes*.

El primer ámbito de consideración de este factor tiene relación con aquellos diseños que deben ser construidos en *zonas con climas agresivos o extremos*. A igualdad de condiciones, diseños que obliguen a realizar tareas de construcción a la intemperie o en forma desprotegida en lugares con alta radiación solar, con temperaturas extremas, alta oscilación térmica, con abundantes precipitaciones (lluvia o nieve), con vientos fuertes, polvo en suspensión, con humedades extremas, alta salinidad, poco oxígeno (e.g. en climas de altura), entre otros elementos climáticos agresivos, tienen menor grado de constructividad.

Es importante aclarar que no es el clima agresivo propiamente tal el que es determinante del grado de constructividad, sino la respuesta de diseño en cuanto a grado de anticipación, previsión y facilitador de desarrollo de tareas de construcción en forma protegida. A diferencia de los primeros 4 factores internos de la constructividad, el clima representa un factor externo que *no puede ser controlado por el equipo de proyecto*. En el análisis de la mano de obra, por ejemplo, se afirma que a igualdad de condiciones, diseños que obliguen el uso de mano de obra escasa en un lugar disminuye su grado de constructividad. Sin embargo, como es un factor interno, esto implica que el equipo de proyecto siempre tiene la alternativa de cambiar el diseño o cambiar la mano de obra: en ciertas ocasiones el equipo de proyecto podría decidir mantener un diseño que requiere mano de obra especializada que no está disponible en el lugar —disminuyendo la constructividad de ese factor— pero aumentando la constructividad total del proyecto a través de los otros factores. La mano de obra es un factor interno afectable por el equipo de proyecto, al igual que los procedimientos constructivos, las herramientas o los materiales. El clima, en cambio, es un factor externo no afectable por el equipo de proyecto, un dato de proyecto, o según el lenguaje propuesto por el MADC, una restricción de diseño (*vid.* § 5.2.1.). 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 en obra dadas por un clima agresivo, y especificar tareas de construcción que pueden ser desarrolladas en forma protegida y controlada.

Por ejemplo, las precipitaciones de lluvia son probablemente uno de los problemas más usuales en obra: impiden desarrollar tareas de excavación por riesgo de derrumbe, obliga a proteger las zonas de hormigonado, añade mayor riesgo a todas las faenas en altura y en terreno descubierto, no se pueden realizar faenas de impermeabilización, obliga a proteger materiales en acopio o disminuye la visibilidad, entre otros múltiples inconvenientes. En la mayoría de los casos, los administradores de obra pueden manejar estas situaciones con cambios en la programación de obra o con protecciones provisionarias. Sin embargo, en el caso de climas extremos donde el nivel de precipitaciones es muy alto, lluvias intensas, con viento o con largos periodos de lluvia, definitivamente el diseño puede jugar un rol clave. Por citar un caso, las pinturas exteriores son prácticamente imposibles de realizar en situaciones de lluvia intensa o cuando hay vientos fuertes, al igual que la aplicación de sellantes o impermeabilizantes líquidos. A fin de aumentar el grado de constructividad, el diseño podría especificar materiales de revestimiento exterior con terminación incluida, pre-pintados o con sellado por presión, o plantear sistemas de revestimiento continuo o de paneles prefabricados, disminuyendo el tiempo de trabajo al exterior.

Un caso más extremo, pero no inusual, es cuando se debe realizar faenas de hormigonado con temperaturas muy bajas o con riesgo de congelación. En estos casos existe un serio peligro que no se desarrolle completamente la reacción química entre el agua y el cemento, inutilizando completamente la mezcla. Para el hormigonado estructural tradicional existen distintos métodos que permiten controlar esta situación, desde simplemente calentar el agua hasta sofisticados aditivos químicos anticongelantes. Sin embargo, faenas como estucado, mortero proyectado (*shotcrete* y/o *gunite*) o reparaciones de nudos son extremadamente difíciles o simplemente no pueden realizarse. De la misma forma, a fin de aumentar el grado de constructividad, en un contexto frío o polar el diseño podría reemplazar este tipo de soluciones por otro tipo de 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*), entre otros.

Otro ámbito de consideración de este factor tiene relación con aquellos diseños que deben construirse en zonas con climas *moderados o con alta variación de las condiciones de tiempo atmosférico*. En estas situaciones el rol principal del diseño es dar flexibilidad de programación y administración, disminuyendo en lo posible aquellas faenas que son dependientes de ciertas condiciones atmosféricas. A igualdad de condiciones, diseños que especifiquen materiales que pueden deteriorarse fácilmente por afecciones climáticas (e.g. corrosión de metales en lugares salinos), que impliquen riesgo de daño de faenas realizadas (e.g. shock térmico en soldaduras en lugares con alta oscilación térmica día-noche), que aumenten probabilidades de retraso o detención

de obra (e.g. instalación de tejas o tejuelas en zonas con vientos matutinos o vespertinos), que obliguen tareas que afectarán el normal rendimiento de la mano de obra (e.g. trabajos en cubiertas reflectantes en zonas de alta asoleamiento), que aumenten el riesgo de error o problemas en la ejecución (e.g. estuco exterior en zonas de asoleamiento intenso), que requieran condiciones específicas de trabajo (e.g. enyesado de muros), que obliguen tareas de compensación por cambios en las condiciones atmosféricas (e.g. secado, humectado, etc.), que disminuyan la seguridad en obra (e.g. excavaciones profundas en zonas con lluvias intermitentes), entre otras muchas situaciones, tienen menor grado de constructividad.

Probablemente la pauta de mejoramiento del grado de constructividad más común en relación con este factor es “*dar la posibilidad de cerramiento temprano*” (CIRIA, 1983; CII, 1987; Adams, 1990; Lam *et al.*, 2006a, 2007; Wong *et al.*, 2006b, entre varios otros). Literalmente aplicada, significa permitir que las faenas de cerramiento puedan ser ejecutadas lo antes posible, idealmente apenas la estructura esté lista. Un diseño que siga esta pauta, podría, por ejemplo, (1) plantear un sistema mixto donde estructura y cerramiento constituyan un solo elemento arquitectónico, (2) diseñar una estructura reticulada liviana tipo *ballon-frame*, que permita rápidamente alcanzar el nivel de cubierta aún sin tener ningún tipo de cerramiento de muros; (3) plantear elementos perimetrales, solidarios con la estructura principal del edificio, que puedan ser construidos primero que el resto y constituir soporte para un cerramiento temporal durante la construcción; etc. Sin embargo, como todas las pautas de constructividad, esta debe entenderse sólo aplicable en el mismo contexto que le dio origen (*vid.* §§ 2.2.2. y 6.4). Por ejemplo, en un proyecto ubicado en un contexto caluroso o donde se realicen faenas interiores con levantamiento de polvo o emisión de gases por adhesivos, el cerramiento temprano sin tener sistemas mecánicos de aire puede implicar una pérdida importante de ventilación interior, y por lo tanto ser incluso más perjudicial.

b. Terreno

El grado de constructividad de un diseño está determinado por 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. Diseños con mayores grados de constructividad son aquellos que implican tareas de construcción que requieren contextos de trabajo que se corresponden con las condiciones topográficas, geotécnicas y ambientales del terreno del proyecto.

En relación a la consideración de este factor, el análisis de constructividad se puede realizar en tres ámbitos distintos: (1) *características propias* del terreno, (2) *grado de incertidumbre* sobre esas características y (3) *características del entorno inmediato* al terreno.

Al igual que lo que ocurre con el clima, el terreno es un factor externo no afectable por el equipo de proyecto. Por lo tanto, no son las características del terreno propiamente tales lo que representa el *corpus* de este factor de constructividad, sino la respuesta de diseño en cuanto grado de anticipación, previsión y facilitador de faenas en la zona de construcción.

El primer ámbito de consideración de este factor tiene relación con las *características propias* del terreno. Estas pueden ser características topográficas (tales como planimetría, altimetría, elementos existentes, etc.), o geotécnicas (tales como composición, resistencia estática y sísmica, presencia de aguas subterráneas, etc.). A igualdad de condiciones, diseños 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 características, tienen menor grado de constructividad.

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; la falta de terreno plano dificulta el almacenamiento de materiales y la instalación de oficinas, comedores u otros necesarios para las faenas; se dificulta el cerramiento de la obra; obliga a la construcción de andamios y plataformas de trabajo; requiere de movimiento de tierras con maquinaria pesada y construcción de refuerzos y muros de contención; es difícil mantener niveles y ajustar la construcción al terreno natural. Ante esto, a fin de aumentar el grado de constructividad, un diseño que deba ser realizado en este tipo de terreno podría, entre otros: (1) plantear una volumetría general que minimice la construcción a diferentes niveles y que concentre la mayor parte del programa en una misma zona; (2) plantear un diseño que respete estrictamente las curvas

naturales del terreno disminuyendo la necesidad de realizar constantes excavaciones y rellenos, (3) dependiendo de las necesidades del programa, plantear una zona general plana cercana al acceso general al sitio, de manera que una de las primeras faenas sea un movimiento pesado de tierras para despejar esa plataforma que luego servirá para la instalación de faenas, (4) pensar un diseño que permita tener más de un acceso a obra, por ejemplo uno superior (a favor la pendiente) y uno inferior (contra de la pendiente), etc.

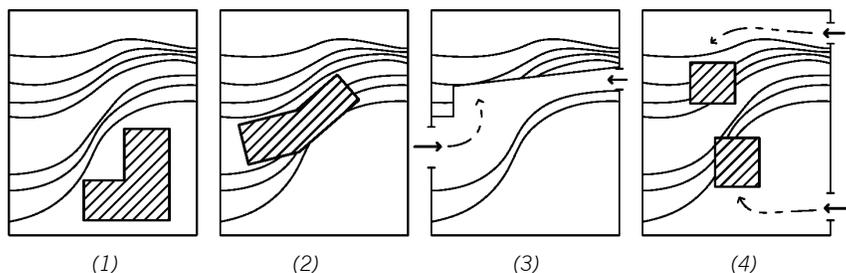


Figura 29:
Ejemplo de cambio de
emplazamiento de
volumen en pendiente
difícil

Otra situación difícil en obra ocurre en aquellos terrenos que tienen características geotécnicas de riesgo o inestables, con baja resistencia, de composición irregular, con presencia de aguas subterráneas, “bolsillos” de gases, fallas geológicas o vetas de minas; o en general, con características heterogéneas o desiguales. Ante esto, a fin de aumentar el grado de constructividad, el diseño podría, por ejemplo, usar como estrategia principal la disminución al mínimo posible el grado de dependencia en las características del terreno, (1) planeando un mejoramiento general del terreno, (2) planteando un sistema de fundaciones de platea continua flotante, (3) fundando con elementos puntuales profundos en zonas específicas donde se conoce con seguridad sus características geotécnicas y sobre ellos desarrollar un sistema de fundación volada, etc., entre otras varias posibilidades.

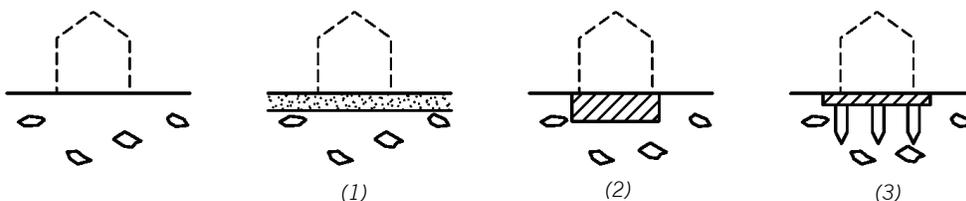


Figura 30:
Ejemplo de cambio de
fundaciones en terrenos
difíciles

Un escenario bastante común de dificultades adicionales en obra ocurre en aquellos terrenos donde existen elementos inamovibles o que deben ser protegidos durante las faenas, tanto *dentro del terreno* (e.g., árboles, monumentos, edificaciones preexistentes, instalaciones, etc.), en el *perímetro del terreno* (e.g. postes de electricidad, señalética urbana, etc.) o *fuera del terreno* (e.g. edificios colindantes que están dentro del radio de giro de la pluma de la grúa). Estas situaciones son especialmente difíciles porque limitan notablemente la accesibilidad interna del terreno (*vid.*

§ 6.2.2.c.). Por ejemplo, un proyecto que considere relevante preservar un árbol existente al interior del terreno e incluirlo como parte de una plaza exterior en el diseño final obliga a encapsular el árbol (protección de follaje y aislación de tierra manteniendo riego y drenaje) durante la obra, especialmente hasta que se construya el pavimento de la plaza, momento en el cual usualmente las protecciones se liberan y el árbol queda en su condición final, vulnerable a posibles destrozos y polución. A fin de permitir prolongar la protección de este elemento, y así aumentar el grado de constructividad del proyecto, el diseño podría, por ejemplo, plantear un pavimento diferente en la zona inmediatamente circundante al árbol, de manera que durante la construcción del pavimento de la plaza el árbol no necesite descubrirse, y sólo una vez que la obra ha disminuido su intensidad y riesgos de daño, se libere su protección y construya el sector faltante.

Un segundo ámbito de consideración de este factor tiene relación con el *grado de incertidumbre* sobre las reales características del terreno. Evidentemente, lo más recomendable siempre es tener el mayor nivel de investigación del terreno; sin embargo muchas veces esto no es posible, por múltiples factores, desde la imposibilidad técnica de estudiar el sitio hasta las limitantes económicas que hacen inviable un estudio exhaustivo. En estas ocasiones, el proyecto se encuentra en una situación especialmente difícil donde las faenas de construcción se pueden volver complejas si las condiciones reales del terreno resultan ser diferentes a las esperadas. Ante esto, a fin de aumentar el grado de constructividad del proyecto, el diseño podría usar como estrategia principal la maximización del grado de flexibilidad y ajuste de diseño en otra según se vayan evaluando las condiciones reales. Por ejemplo, en un terreno con altimetría muy variable, deslindes en pendientes inaccesibles y geometría general irregular, el levantamiento topográfico tiene un potencial mayor grado de inexactitud. El diseño volumétrico general, anticipando los problemas de obra que pueden ocurrir por esta situación, podría plantearse con dos unidades perimetrales de dimensiones flexibles y ajustables a las condiciones reales del sitio, disminuyendo la presión por exactitud en obra.

El tercer ámbito de consideración de este factor tiene relación con las condiciones y grado de sensibilidad del *medio ambiente inmediato* al terreno. Terrenos de construcción que estén en un entorno vulnerable, que tengan estructuras medianeras colindantes, que se encuentren en contextos sensibles natural o socialmente (e.g. colindante con colegios, hospitales) o que tengan infraestructura pública bajo el terreno, entre otras situaciones, representan escenarios donde el nivel de dificultad aumenta. Por ejemplo, en un terreno altamente complejo, como aquellos con edificios de cuidado de ancianos y jardines infantiles como propiedades colindantes, mantener un estricto control de la polución atmosférica o del ruido puede representar un punto complicado para la administración de obra. A fin de disminuir los posibles problemas y aumentar el grado de constructividad del proyecto, el diseño podría plantear un sistema constructivo prefabricado en seco que minimice las faenas ruidosas en terreno y las que ocasionan levantamiento de partículas en suspensión.

c. Accesibilidad

El grado de constructividad de un diseño está determinado por 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. Diseños con mayores grados de constructividad son aquellos que especifican tareas de construcción que requieren una cantidad de espacio libre para maniobras y vías de transporte de carga que se corresponden con la disponibilidad real del terreno.

En relación a la consideración de este factor, en el análisis de constructividad se debe distinguir entre dos situaciones completamente diferentes: (1) *accesibilidad interna*, referida a las consideración del espacio libre necesario al interior del sitio de construcción; y (2) *accesibilidad externa*, referida a la consideración del espacio libre, vías de acceso y capacidad de carga desde el exterior hasta el sitio de construcción, específicamente, de aquellas vías de conexión con proveedores de materiales, instalaciones industriales y otros sitios relevantes para el proceso en obra.

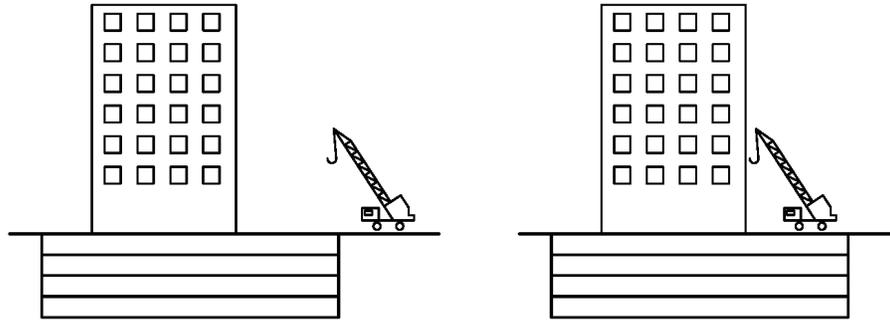
El primer ámbito de consideración de este factor tiene relación con la *accesibilidad interna* del terreno. A igualdad de condiciones, diseños que involucren u obliguen trabajos en terrenos vecinos, que requieran mayor instalación de faenas y/o almacenamiento de materiales, que especifiquen materiales y productos de grandes dimensiones que requieran maquinaria o gran cantidad de espacio para su manipulación, que requieran de construcción de andamios o plataformas de trabajo apoyadas en formas irregulares, flotantes o colgantes, que obliguen a tomar medidas de seguridad adicionales por riesgos de caídas desde espacios de trabajo reducidos en altura, que presenten detalles complejos o inaccesibles, entre otras varias situaciones, tienen menor grado de constructividad.

El análisis de accesibilidad interna se puede hacer en tres dimensiones o escalas diferentes: (1) *escala mayor*, referida a la accesibilidad de grandes equipos o maquinarias; (2) *escala media*, referida a la accesibilidad de los trabajadores y su espacio personal de trabajo y (3) *escala menor*, referida a la accesibilidad al detalle o elemento puntual de construcción.

Por ejemplo, un proyecto de edificios de oficinas típicamente contempla una torre con (a veces) generoso espacio público libre en primer piso, y un complejo de estacionamientos subterráneos de 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, como un camión *mixer* con concreto, obligando a mantener ese espacio valioso de trabajo con carga liviana. En el caso del concreto, la distancia adicional requerida para estacionar el camión es, por dar un caso, 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

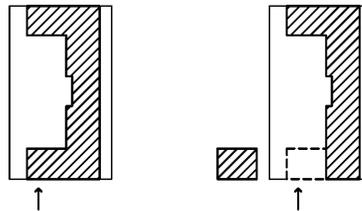
aumentar el grado de constructividad, un diseño podría reforzar una zona parcial de la losa (lo que es un costo marginal en términos de estructura), permitiendo su uso como plataforma de carga pesada en la proximidad inmediata a la torre. Demás está decir que esta decisión no sólo es valiosa desde el punto de vista de mejoramiento de constructividad, sino además del desempeño posterior del edificio, por ejemplo, permitiendo el acercamiento de camiones de bomberos cargados con toneladas de agua.

Figura 31:
Ejemplo de cambio de losa para dar acceso a maquinaria pesada



Otro ejemplo de consideración de accesibilidad interna en escala mayor se da en aquellos edificios complejos en terrenos estrechos o urbanos de alta densidad. En estas situaciones el uso de maquinaria pesada, movimiento de materiales o incluso colocación de estructuras auxiliares temporales se ve notablemente reducido. A fin de aumentar el grado de constructividad, un diseño podría, por ejemplo, plantear un diseño en el cual una sección estratégica del edificio es estructural y constructivamente independiente, de manera que se pueda desarrollar al último y mantener ese espacio clave como área libre de maniobra.

Figura 32:
Ejemplo de segmentación del edificio para permitir acceso al terreno



La escala media es tradicionalmente la que más problemas genera, precisamente porque es la menos considerada por el diseño. Contempla tener en cuenta el espacio mínimo de trabajo para el obrero y su entorno inmediato. Solo por nombrar algunas, son preguntas que caen en esta categoría: donde poner los andamios, donde acumular los materiales y herramientas que requiere el trabajador para su desempeño en su puesto, como evitar el transporte continuo de materiales desde la bodega

en la instalación de faenas y el punto de trabajo, que tipo de herramientas o equipos se requieren y si es posible utilizarlos en ese espacio libre, etc. Por ejemplo, los componentes de construcción que pueden ser utilizados por un trabajador sin apoyo mecánico son los ideales; hasta dos personas es aceptable. Cuando un componente debe ser manipulado necesariamente por tres o más trabajadores, se convierte en una faena que aumenta exponencialmente los requerimientos de espacio libre de manipulación. Ante esto, a fin de aumentar el grado de constructividad, un diseño podría, entre otros, cambiar el tamaño, peso o forma de los componentes, haciéndolos de más fácil manipulación.

La escala menor se refiere al acceso al detalle o punto específico de trabajo. Conexiones inaccesibles (e.g. clavado interior), espacios muy reducidos para el uso de herramientas (e.g. soldadura), lugares inalcanzables (e.g. interior de shafts), son muestras de esta situación. Por ejemplo, un caso relativamente frecuente es el de enfierraduras muy densas en elementos esbeltos de hormigón, lo que no sólo dificulta su armado por el enfierrador sino además hace extremadamente complejo su vibrado. Muchas veces las sondas vibratoras quedan totalmente imposibilitadas de penetrar, obligando a usar métodos de vibrado exterior o recurrir a hormigones autocompactantes. A fin de aumentar el grado de constructividad, un diseño podría, por ejemplo, sustituir la enfierradura tradicional por un elemento prefabricado conector en acero, que reciba los elementos de hormigón a través de anclajes y conectores sólidos.

El segundo ámbito de consideración de este factor tiene relación con la *accesibilidad externa* al terreno. A igualdad de condiciones, diseños que tengan perímetros irregulares con cerramientos herméticos, que tengan vanos pequeños que dificulten el ingreso de materiales, que necesiten del uso de la vía pública para la carga/descarga o para el estacionamiento continuo de camiones y maquinaria, que requieran traslado de componentes de grandes dimensiones desde sitios lejanos, que obliguen a considerar rutas alternativas para el traslado de productos, que sean de difícil acceso para la mano de obra, entre otras varias situaciones, tienen menor grado de constructividad.

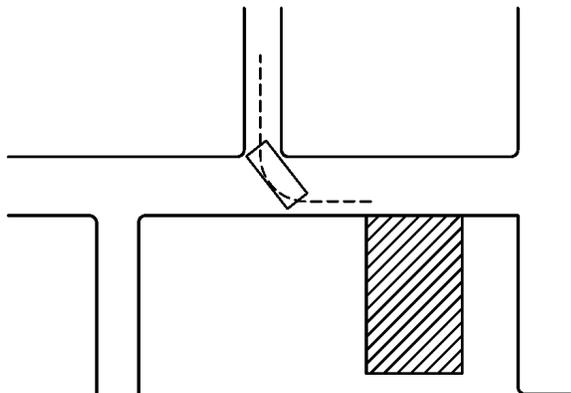
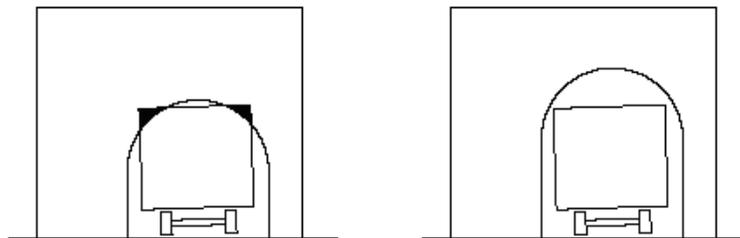


Figura 33:
Ejemplo de poca
accesibilidad exterior

La *accesibilidad externa mediata* del terreno es clave al momento de tomar las decisiones de diseño relacionadas con el grado de prefabricación *on-site* u *off-site*, o para la especificación de materiales especiales que deben ser transportados desde lugares lejanos al sitio de construcción. Caminos estrechos, con pendientes pronunciadas, con curvas cerradas o trazados geométricos difíciles pueden reducir la facilidad de transporte, requerir escolta policial o incluso lisa y llanamente impedir el transporte. Es, por ejemplo, lo que ocurre usualmente en terrenos urbanos en cascos históricos donde el trazado de calles no permite el giro de camiones o maquinarias de grandes dimensiones. Alturas de pasos bajo nivel, anchos de puentes, carga máxima de puentes, dimensiones de túneles, o pendientes máximas también definen los tamaños y cargas máximas de elementos o materiales de construcción, y directamente, de los componentes constructivos del proyecto. Métodos alternativos de transporte, como la carga marítima en terrenos costeros o incluso la carga pesada aérea son muy costosos y por lo tanto extremadamente inusuales.

Situación similar ocurre con el borde del terreno y cerramiento del edificio, denominada *accesibilidad externa inmediata* o perimetral. Las dimensiones máximas de los elementos de construcción, tales como materiales, componentes o maquinaria necesaria, están determinadas por el tamaño y forma de las aperturas en el borde del terreno y cerramiento del edificio. Por ejemplo, en una simple obra de remodelación de un baño en una casa particular, la instalación de una tina de loza de cuerpo completo está supeditada al tamaño de las puertas o ventanas que conecten hasta el punto de construcción. En obras mayores, muchas veces el diseño de aperturas obliga a ingresar y almacenar materiales (e.g. planchas de yeso cartón) o equipos (e.g. calderas, equipos hidroneumáticos), al interior de los futuros recintos antes de realizar las divisiones interiores, pues de lo contrario después no podrían ser introducidos, lo que evidentemente, añade una capa adicional e innecesaria de complejidad a la obra ante los mayores cuidados de protección. Ante esto, entre otras posibilidades, a fin de aumentar el grado de constructividad, el diseño podría plantear una serie de divisiones interiores sobrepuestas y desconectadas del resto, que puedan ser instaladas al final, y que liberen un pasillo o acceso general de los materiales, equipos y maquinarias necesarias al punto de construcción.

Figura 34:
Ejemplo de cambio de
acceso en proyecto para
permitir ingreso de
vehículos



d. Tiempo

El grado de constructividad de un diseño está determinado por la cantidad de tiempo que se requiera para realizar las tareas de construcción definidas por el proyecto. Diseños con mayores grados de constructividad son aquellos que implican tareas de construcción que se ajustan al mínimo posible de tiempo disponible en el contexto del proyecto.

En general, una obra de construcción pretende realizarse en el menor tiempo posible, pues cada día adicional de trabajo representa un costo en gastos directos y gastos generales, retraso en el proceso de venta, mayor costo del crédito, etc. Los administradores de obra, por definición, realizan su mejor esfuerzo en programar las actividades de manera de cumplir con este mandato; pero en ocasiones, el proyecto presenta características que hacen este trabajo más difícil de lo normal. Limitaciones por regulaciones, tales como restricciones de horarios de trabajo, o limitaciones dadas por terceros, tales como entrega restringida de materiales o servicios de terceros, por ejemplo, constituyen restricciones no afectables por el equipo de proyecto. Frente a estas, y tal como ocurre con todos los factores externos, el diseño puede anticipar problemas y plantear soluciones alternativas que minimicen estas situaciones, aumentando el grado de constructividad del proyecto. En otras ocasiones, el rol del diseño es más directo, como por ejemplo cuando la causa de limitaciones de tiempo se genera en la especificación de tareas de construcción con tiempos o ritmos de ejecución muy diferentes o que generan necesariamente tiempos muertos de trabajo. Estos dos tipos de limitaciones representan los dos ámbitos de análisis de este factor de constructividad: el primer tipo se denomina (1) *restricciones de tiempo externas a obra*, y el segundo tipo, (2) *restricciones de tiempo internas a obra*.

El primer ámbito de consideración de este factor tiene relación con las restricciones de tiempo *externas a obra*, es decir, aquellas que se generan por limitaciones fuera del alcance de control del equipo de proyecto. En este contexto, a igualdad de condiciones, diseños que involucren tareas que no se puedan realizar en determinados horarios restringidos por legislaciones o regulaciones locales, que impliquen contratación de servicios externos a proveedores de baja velocidad de respuesta o con irregular desempeño, que sólo se puedan realizar a cierta hora del día o con específicas condiciones ambientales, que impliquen constante carga y descarga en lugares con acceso restringido de camiones, que impliquen faenas ruidosas en lugares con horarios protegidos, entre otras características, tienen menor grado de constructividad.

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.

El segundo ámbito de consideración de este factor tiene relación con las restricciones de tiempo *internas a obra*, es decir, aquellas que se generan por demandas de tiempo de las propias faenas al interior de la obra y bajo el control del equipo de proyecto. A igualdad de condiciones, diseños que requieren tareas de construcción con tiempos de ejecución notablemente más lentos que el resto de las faenas, que requieren tareas con tiempos muertos de espera (e.g. secado, fraguado, etc), que requieren faenas que son necesariamente lentas o pausadas en su ejecución, entre otras varias características, tienen menor grado de constructividad.

Por ejemplo, el levantamiento de muros de albañilería tradicional con ladrillo de arcilla cocida hecho a mano y mortero de pega hecho en obra es, por defecto, una faena que no se puede acelerar por sobre su rendimiento clásico. No se pueden levantar más de 8 o 10 hiladas en una misma jornada, pues el peso de los ladrillos superiores aplasta a los inferiores, ni tampoco se puede extender la jornada de trabajo muy temprano o muy tarde porque los cambios de temperatura provocarían deshumectación descontrolada. Ante esto, en un proyecto que deba reducir su tiempo de construcción, a fin de aumentar el grado de constructividad, el diseño podría, por ejemplo, reemplazar la albañilería tradicional por albañilería a base de bloques de hormigón celular autoclavado, que usan un mortero adhesivo de 3 mm de tendel, y por tanto, se puede levantar el muro completo en una jornada. Además, dado que es un mortero elástico especial, soporta mejor los cambios de temperatura y no corre el riesgo de contracción de fragua.

Otro caso de análisis de este mismo factor podría ser un proyecto que tenga una mayor restricción de tiempo de construcción. Aquí, todas las faenas húmedas se han reducido al mínimo posible, de manera de mantener una línea de trabajo ininterrumpida y que no genere tiempos de fragua, curado o secado. En este contexto, a fin de aumentar el grado de constructividad, el diseño podría, por ejemplo, plantear un sistema de prefabricación en seco en terreno, con dos líneas de trabajo que funcionen en paralelo. Para simplificar el montaje, se plantea que el número de partes se reduzca y que los componentes sean productos que requieran mínima terminación en su posición definitiva, así como que sean del máximo tamaño disponible que pueda ser manipulado por 1 o dos trabajadores.

Otra dimensión de consideración en proyectos que tienen tiempos de construcción especialmente reducidos está en la cantidad de tareas secundarias o auxiliares necesarias. A igualdad de condiciones, diseños que impliquen construcción de estructuras temporales (e.g. plataformas de

trabajo), movimientos de tierras sólo para fines de operación en terreno (e.g. rampas, taludes), toma de medidas especiales de seguridad (e.g. construcción de puntales de sujeción, entibaciones, panderetas), construcción de elementos de uso único (e.g. moldes, plantillas o similares), entre otras características, tienen menor grado de constructividad.

En general, el análisis de constructividad por limitantes de tiempo internas a obra está estrechamente ligado al análisis del factor de procedimientos constructivos (*vid.* § 6.2.1.b.). En este aspecto, la principal estrategia de análisis consiste en repasar imaginariamente la secuencia constructiva y la consecuente probable programación de obras a fin de identificar aquellas tareas que limitan la velocidad de construcción, los posibles choques de actividades, las tareas que generan tiempos muertos de espera, los “cuellos de botella”, o las actividades claves dentro del camino crítico. A fin de aumentar el grado de constructividad en proyectos con tiempos de construcción reducidos, el diseño puede actuar sobre todas estas tareas, cambiando aquellos aspectos que las obligan e introduciendo alternativas que den flexibilidad de programación.

§ 6.2.3. Factores transversales

96

a. Comunicación

El grado de constructividad de un diseño está determinado por 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. Diseños con mayores grados de constructividad son aquellos que son interpretados y comprendidos más fácilmente por el equipo constructor.

A diferencia de los factores internos o externos —que se refieren fundamentalmente a las características del producto de diseño (el propio edificio diseñado)— los factores transversales se refieren fundamentalmente a las características del proceso de diseño (el modo de trabajo de los diseñadores). Son, sin embargo, de gran impacto en el nivel de dificultad de obra y son absolutamente afectables por el equipo de proyecto. En el caso del factor de comunicación, se refiere específicamente a la etapa de elaboración del expediente técnico de proyecto que posteriormente será interpretado por el equipo constructor para su materialización y a la comunicación entre diseñadores y constructores durante el transcurso de obra.

En relación a la consideración de este factor, el análisis de constructividad distingue entre: (1) calidad del *producto de comunicación*, entendido como el expediente físico o digital de información que el equipo diseñador le entrega al equipo constructor para su interpretación y materialización y (2) calidad del *proceso de comunicación*, entendida como la relación social profesional y proceso de intercambio de información entre el equipo diseñador y equipo constructor durante el desarrollo de la obra.

El primer ámbito de consideración de este factor tiene relación con la calidad del *producto de comunicación*. A igualdad de condiciones, diseños que estén incorrectamente documentados, con 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 características, tienen menor grado de constructividad.

La regla elemental general es que 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, mayor tiempo de estudio, consultas al equipo diseñador y mayor cantidad de reuniones de coordinación son necesarias. En el peor de los casos, construcción de diseños equivocados, cambios

de proyecto por errores de interpretación o errores que amenazan la calidad o seguridad en obra son algunos de los problemas ocasionados por diseños con baja constructividad por fallas en la consideración de este factor.

En la industria de la construcción actual, el dibujo técnico planimétrico es (todavía) el principal medio de comunicación de proyecto. Usualmente, el expediente técnico de proyecto consiste en un conjunto de dibujos en papel de gran tamaño y un archivador con especificaciones técnicas escritas en formato carta u oficio. Estos documentos se conservan en la oficina técnica en obra y deben ser analizados e interpretados visualmente en forma análoga por el equipo constructor. Con este método de trabajo, el mismo que se ha mantenido sin cambio durante los últimos 200 años, la calidad gráfica, tipos de formatos y escalas, uso de notas y observaciones escritas o los estándares de expresión planimétrica son fundamentales. Los problemas más comunes son (1) información insuficiente e (2) información incoherente.

El principal problema es la información insuficiente, tales como baja cantidad de cortes y escantillones que no alcanzan a describir todo el proyecto, planos generales con falta de detalles constructivos con encuentros no resueltos, falta de indicación de materiales en los planos y ambigüedad en las especificaciones, falta de diseño constructivo de modulación o cortes de material, acotado insuficiente o falta de información sobre proceso de montaje, ensamble o construcción del detalle, entre los más recurrentes. El segundo problema es la información incoherente entre los distintos soportes gráficos, tales como planos que indican una solución y que no se refleja en otros, sobreadundancia de planos que obliga al constante cruce de información entre distintos dibujos, detalles genéricos que no son aplicables, dibujos bidimensionales ambiguos o falta de vistas isométricas o espaciales para la comprensión total, especificaciones obsoletas o no concordantes, entre los más recurrentes.

En proyectos incompletos o con información incoherente se requieren constantes aclaraciones, cambios o modificaciones de proyecto durante el transcurso de obra, lo que de no hacerse correctamente, constituyen más problemas que soluciones. Por ejemplo, cambios de proyecto no coordinados, no difundidos, no reflejados en los planos, no ampliamente informados, cambios en especificaciones de producto sin modificación en las dimensiones o modulación en los planos, o modificaciones parciales que no asumen la modificación de partidas conectadas, son situaciones que retrasan o definitivamente impiden el desarrollo de la obra afectando seriamente el grado de constructividad del proyecto.

Una estrategia ampliamente recomendada (Thabet, 1999) para aumentar el grado de constructividad de los diseños por consideración de este factor, es el uso de tecnologías digitales de visualización y comunicación con modelos 3D. El uso de este tipo de modelos computacionales ha demostrado ser un efectivo método para la reducción de incoherencias espaciales, interferencia física y falta de

concordancia entre distintos soportes gráficos. Asimismo, permite un mayor y más rápido entendimiento por parte del equipo constructor (incluyendo a obreros), y consecuente disminución de tiempo de análisis e instrucción. Los modelos BIM (*vid.* § 3.2.1.b.) permiten además concentrar no sólo la información geométrica espacial del proyecto, sino además la información de materiales, cantidades y otras especificaciones, concentrando en un solo lugar un porcentaje considerable de la información de construcción, lo que disminuye el cruce de soportes y la probabilidad de error. Dado que son intrínsecamente unitarios, los cambios de proyecto son siempre reflejados en toda su dimensión y son de inmediata actualización.

El segundo ámbito de consideración de este factor tiene relación con la calidad del *proceso de comunicación*, o lo que también se denomina *relación vertical* del equipo diseñador. Está constituida por todo intercambio de información entre el equipo diseñador y el equipo constructor *a posteriori* de la elaboración del expediente de proyecto, tales como reuniones, visitas a obra, comunicación por correo electrónico o llamadas por teléfono, memorándums con cambios en las especificaciones técnicas o dibujos con modificaciones de proyecto, entre otros. Proyectos en los cuales el equipo diseñador tenga dificultades de comunicación con obra, no pueda hacer visitas con la regularidad requerida, no estén todos los medios ideales de intercambio de información, la velocidad de respuesta sea baja, existan impedimentos legales, administrativos o técnicos para hacer modificaciones de proyectos a la velocidad de obra, entre otros, son escenarios difíciles para el diseño y que, de no preverse y tomarse las medidas adecuadas, amenazan su grado de constructividad.

Por ejemplo, en un proyecto que deba realizarse en una zona alejada, con dificultades para realizar visitas a obra o que la administración tiene poca experiencia, a fin de aumentar el grado de constructividad, el diseño podría, (1) plantear un proyecto con un alto uso de componentes industrializados y disponibles en el mercado que disminuya la cantidad de faenas en obra, (2) plantear un proyecto con mínima variación de componentes, tareas y soluciones de diseño, (3) proponer un diseño en sucesivas etapas iguales, de manera que el equipo diseñador pueda inspeccionar la primera y sólo sobreinspeccionar las siguientes, (4) plantear un sistema de montaje de partes que impida el montaje incorrecto a través de componentes especialmente diseñados para tal fin, etc.

b. Coordinación

El grado de constructividad de un diseño está determinado por 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. Diseños con mayores grados de constructividad son aquellos en que las distintas especialidades se integran y complementan más plenamente y se pueden construir con menos interferencias por el equipo constructor.

De forma similar con lo que ocurre con el factor de comunicación, en este factor se puede distinguir entre el *producto de coordinación*, entendido como el grado de coherencia entre los distintos subsistemas y proyectos de especialidades, y el *proceso de coordinación*, entendido como el grado de fluidez de la relación social profesional y de la intensidad y calidad del proceso de intercambio de información al interior de los distintos integrantes del equipo diseñador. La relación entre todos los integrantes al interior del equipo diseñador también se denomina *relación horizontal*.

El principal ámbito de consideración de este factor tiene relación con la calidad del *producto de coordinación*. A igualdad de condiciones, diseños 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, tienen menor grado de constructividad.

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.

El uso de herramientas digitales contribuye positivamente en el mejoramiento del nivel de coordinación de los proyectos. Las herramientas informáticas de primera generación son aquellas que permiten organizar los distintos archivos producidos por cada uno de los participantes en una misma plataforma, de manera que la información producida por unos sea visible por otros, que cualquier actualización o cambio sea inmediatamente conocido por todos los demás participantes y

que los archivos existan siempre en su última versión, en una única copia centralizada. En general consisten en bases de datos centralizadas de acceso compartido (*offline u online*) apoyados por software de administración de archivos, tales como detección de archivos o información duplicada, control de actualizaciones, gestores de correo, etc.

La segunda generación de herramientas digitales son aquellas que no solo permiten organizar los distintos archivos producidos independientemente por cada uno de los participantes, sino que permiten a los diseñadores trabajar conjuntamente sobre un mismo archivo, realizando toda la coordinación desde un primer momento. Los sistemas BIM, por definición, intentan concentrar toda la información de los distintos participantes en un solo modelo y evitar toda incoherencia. Sin embargo, su desarrollo es relativamente reciente y por tanto todavía no alcanzan el real potencial de utilidad que se espera de ellos. Problemas en el traspaso de diferentes formatos de información (o interoperabilidad) y limitaciones y faltas de flexibilidad en los software, así como indefiniciones en el modo de trabajo, responsabilidad profesional sobre el modelo o en la administración del modelo son los principales problemas que hoy la industria enfrenta con estos sistemas.

§ 6.3. Principios de la constructividad

a. Principio de simplificación de tareas de construcción

101

El principio de simplicidad es el más básico y natural de todos: proyectos que requieran tareas de construcción más sencillas de realizar determinan menor dificultad total de construcción. La especificación de diseños de geometrías sencillas y fáciles de comprender y trasladar al sitio (*i.e.* fáciles de trazar), que requieran menor grado de habilidad de la mano de obra, que necesiten herramientas y equipos de uso habitual, que permitan mayores tolerancias, que utilicen sistemas de montaje simples, que requieran materiales conocidos y fáciles de manipular, entre otros muchos otros ejemplos, son aproximaciones intuitivas al principio de simplificación de tareas de construcción.

Desde el punto de vista analítico propuesto por el MADC, el principio se explica por el primer mecanismo de reducción de dificultad, descrito en § 5.2.1.(1), según la cual la elección de características de diseño que impliquen tareas con menor dificultad unitaria, es decir aquellas cuyos indicadores de dificultad son mayoritariamente de tendencia positiva, disminuye la dificultad total del proyecto.

Por ejemplo, un diseño de un edificio pequeño que por condiciones de carga y resistencia de terreno se requieran fundaciones profundas, anchas y próximas unas a otras define tareas de construcción de alta dificultad unitaria. Este diseño implica excavar dejando remanentes de terreno angostos o inestables: construcción de socialzados y entibaciones son necesarias, es decir mayor cantidad de acciones de construcción. Debido al mayor perímetro lineal de excavación, una mayor superficie de terreno queda inutilizada para transporte de materiales y personal, disminuyendo la accesibilidad interior. Los obreros deben ser más prolijos en una excavación de diseño complejo y quizás la excavación a máquina no pueda ser realizada debido a la proximidad entre una zanja y la siguiente. El retiro de material se hace más difícil, debido al menor espacio de circulación y a la falta de lugar para montar rampas para carretillas. El tiempo de excavación aumenta, al igual que los riesgos de seguridad. En este escenario es muy probable que, en terreno, el constructor decida cambiar el diseño ligeramente y realizar una excavación total hasta el mínimo nivel especificado, eliminando todas estas dificultades adicionales, y luego de hormigonar las fundaciones, rellenar los espacios intermedios —contemplados como “terreno natural” en el diseño original— con material de aporte compactado. Esto, si bien incluye nuevas tareas con nuevas dificultades unitarias (acumular material de aporte, compactar, etc.) es, a fin de cuentas, más simple de construir que el diseño original. Un diseño con alta constructividad y que considere esta situación, podría, siguiendo el principio de simplicidad, contemplar desde el comienzo este diseño más sencillo de construir, e incluso, podría aprovechar el espacio entre fundaciones, en vez de ser rellenado, como espacio útil de diseño, tales como espacio para instalaciones o equipos.

El principio de simplificación es transversalmente referenciado por casi toda la literatura existente (*vid.* § 4), existiendo amplio acuerdo en su importancia fundamental. Prácticamente la totalidad de los autores claman por mayor simplicidad en los diseños como el mecanismo más directo para aumentar la constructividad de los proyectos. Sin embargo, es también unánime la opinión que el mayor problema de aplicación de este principio —aparentemente “obvio” para los constructores (Glavinich, 1995)— es que los equipos diseñadores tienen dificultad para detectar qué es lo que representa una tarea de construcción simple. Por ejemplo, es frecuente que diseños más “simples” sean malentendidos como tradicionales, simplistas, elementales o reduccionistas, y por tanto, poco atractivos para los diseñadores. Se crea una aversión inicial por ignorancia. Sin embargo, Adams (1990) da el ejemplo de *“un cascarón parabolóide hiperbólico de madera, un muro diafragma de ladrillo postensado, un pórtico de celosía triodesica 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”*. El MADC es una metodología de análisis, que si bien compleja, entrega la posibilidad a los diseñadores de evaluar sus proyectos y determinar qué tan difícil es de construir.

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 “reglas mágicas” universales sobre qué es un diseño simple. Lo que es un diseño simple en un proyecto definido, puede ser una solución de alta dificultad en otro proyecto, debido a que la mano de obra, el terreno o las condiciones climáticas, por ejemplo, no son las mismas. Por poner un caso, supóngase que se quiere comparar la dificultad de construcción de dos soluciones constructivas para los tabiques divisorios interiores en un edificio de hormigón armado: (1) tabiquería de metal galvanizado y (2) bloques de hormigón celular (para efectos de esta explicación, se asume que las características de desempeño finales según requerimientos de uso y costo son equivalentes o despreciables, a fin de hacer un análisis estrictamente centrado en la dificultad de construcción, y por tanto, constructividad de ambos diseños). De acuerdo a la metodología de análisis de dificultad propuesta por el MADC, primero, se procede a identificar cuáles son las tareas de construcción necesarias requeridas para la realización de cada una de las soluciones, tanto aquellas tareas particulares a cada solución (*e.g.* dimensionado y corte de perfiles, ensamble con remaches u otro tipo de fijación metálica, colocación de aislación y colocación de revestimientos, entre otras, para el caso de la tabiquería, o preparación de mezcla adhesiva, tendido de hiladas, colocación de conectores metálicos y relleno de espacios de encuentro con elementos estructurales con poliuretano u otro agente elástico, en otras, para el caso del hormigón celular) como las que son comunes a ambas soluciones (*e.g.* transporte y almacenamiento de material, trazado, terminación final, colocación de instalaciones si corresponden, etc). A continuación, se debe identificar en cada tarea los 6 componentes básicos, y determinar cuáles son los indicadores de dificultad relevantes para cada uno. Es aquí donde las condiciones particulares de trabajo comienzan a definir el resultado. Por ejemplo, para el componente sujetos, es

más difícil encontrar mano de obra especializada en albañilería de hormigón celular —un sistema constructivo relativamente nuevo en Chile—, que para la tabiquería en metal —un sistema constructivo de principios similares a la madera—. Si el proyecto está en una zona de limitada mano de obra, este componente es altamente relevante para la ponderación de dificultad. Para el componente de contexto, la albañilería es un sistema constructivo húmedo, mientras que la tabiquería es en seco. Si el proyecto está en un contexto con condiciones climáticas extremas, con tiempo ajustado o incluso con limitado acceso a agua limpia, entonces esta condición se vuelve relevante.

Este principio, aunque simple de comprensión, es de relativa difícil aplicación, debido a que es, por definición, integrado y ponderado. Es integrado porque cada decisión de diseño repercute siempre sobre distintos factores, por lo que no se puede aplicar el principio de simplicidad para un factor sin tener en cuenta los demás. Es ponderado, porque cada factor tiene un impacto relativo en la dificultad de la tarea, dependiendo de las circunstancias propias del proyecto. Ante esto, el MADC presenta una alternativa para realizar el análisis y poder evaluar el impacto de la aplicación del principio. Por ejemplo, la modulación es una técnica común para simplificar las tareas de construcción. Cuando los diseños están modulados de acuerdo a las dimensiones de los materiales, en obra las acciones se simplifican, por ejemplo, porque se deben hacer menos cortes, porque las medidas de cortes son constantes, porque todos los elementos son iguales y no existe riesgo de equivocación de instalación de pieza equivocada, entre otros. Pero, supóngase un cielo falso en el que se tiene la opción de (1) modular los cortes en la estructura de madera de acuerdo a las dimensiones de las planchas o (2) modular los cortes de planchas de acuerdo a las dimensiones de la madera. Asumiendo equivalencia de desempeño para este ejemplo, (e.g. capacidad estructural o capacidad de recibir instalaciones, etc.), la aplicación del principio de simplicidad obliga a analizar ambas tareas y, en forma integrada, ponderar cual tiene mayor impacto sobre la dificultad unitaria. Luego de analizar cada uno de los 6 componentes en ambos escenarios, se puede concluir que, en un contexto tradicional, los cortes en las planchas de yeso-cartón, en comparación con los cortes en madera, requieren herramientas más complejas, mayor precisión en la acción de corte, mayor tiempo de ejecución, son de mayor fragilidad, mayor costo por equivocación, obliga a tareas secundarias (i.e. juntas), existen mayores riesgos de afecciones secundarias (i.e. humedad), entre otras razones, por lo que la optimización integrada y ponderada de dificultad unitaria es mayor. Conclusión: modular la estructura de madera de acuerdo a las dimensiones del yeso-cartón genera una tarea de construcción más simple.

b. Principio de reducción de tareas de construcción

El principio de reducción de tareas es la segunda manera intuitiva de reducir dificultad de construcción desde el diseño. La especificación de diseños prefabricados (en todas sus posibilidades: abierta o cerrada, en terreno o en industria, etc.), que especifiquen materiales discretos y continuos, que privilegien productos industriales pre-terminados, que mantengan una modulación coherente, que disminuyan la necesidad de tareas secundarias o auxiliares, que definan detalles y soluciones de diseño más simples, entre otros muchos otros ejemplos, son aproximaciones intuitivas al principio de simplificación de tareas de construcción.

Desde el punto de vista analítico propuesto por el MADC, el principio se explica por el segundo mecanismo de reducción de dificultad, descrito en § 5.2.1.(2), según la cual la elección de características de diseño que impliquen menos tareas de construcción disminuye la dificultad total del proyecto. En palabras más simples, consiste en preferir aquellos diseños que se construyen con una menor cantidad de tareas de construcción, o visto de otra manera, optimizar los diseños para eliminar pasos, etapas y tareas de construcción en obra.

Este principio es sumamente importante porque es el principal argumento analítico que explica la promoción de industrialización y prefabricación como estrategia de diseño para aumentar la constructividad. Por ejemplo, un proyecto que deba ser construido en un terreno rural con poca accesibilidad a recursos productivos, de difícil topografía e inestable condición de suelo, con clima agreste y dificultades de comunicación, prácticamente todas las tareas tienen alta dificultad unitaria. A fin de aumentar su grado de constructividad, un diseño podría tratar de eliminar la mayor cantidad de tareas de construcción en terreno, y sustituirlas por tareas desarrolladas en un ambiente que cuente con indicadores favorables a los factores negativos. El proyecto podría ser prefabricado en casi su totalidad en industria y luego transportado al sitio, donde las tareas se reducen exclusivamente a montaje. Menor cantidad de tareas con menor dificultad unitaria: mayor 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 del campanario 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 del *kit* de puerta, como la prefabricación de la cúpula en un lugar distinto al tope del campanario permiten eliminar tareas en obra.

La industrialización y prefabricación como mecanismos de mejora de constructividad actúan tanto de manera directa como indirecta. Los proyectos con alto número de elementos y componentes industrializados, o proyectos en que parcial o totalmente tengan partes prefabricadas trasladan un número de tareas necesarias fuera de su sitio de construcción a uno distinto sin la afección de los problemas propios del terreno. Pero estas estrategias de diseño también actúan de manera indirecta. Los componentes industrializados y/o prefabricados no sólo reducen la cantidad de tareas en obra, sino que además aprovechan las ventajas comparativas que existen en entornos de producción controlados, con mayores y mejores recursos productivos. No sólo se eliminan los problemas del terreno, sino además se agregan las cualidades positivas de un entorno especialmente preparado para la producción. Por ejemplo, la construcción de ventanales compuestos, aquellos que además del cristal integran capas de celosías, aislación térmica y/o acústica o dispositivos de control térmico, por nombrar algunos, representan faenas extremadamente complejas de realizar en obra. Precisión y pulcritud son necesarias a un nivel que raramente se consigue en obras tradicionales. Más aún, cuando las fachadas son complejas geométricamente (e.g. vanos irregulares), cuando las faenas previas son de baja confiabilidad (e.g. exactitud en dimensiones de obra gruesa), o cuando los materiales son de naturaleza inestables (e.g. madera), la baja constructividad puede amenazar directamente la calidad esperada del proyecto. Soluciones de ventanas industrializadas eliminan todas estas faenas complejas del terreno, pero además permiten agregar otras que serían imposibles en obra, como tratamientos químicos, sellos al vacío y control de calidad instrumental.

La eliminación de tareas de construcción debido a prefabricación e industrialización existe en varios niveles: se reducen tanto las primarias como las secundarias. En obras prefabricadas menor cantidad de acciones auxiliares son necesarias (e.g. construcción de moldajes, andamios, almacenamiento de materiales, limpieza, instalación de dispositivos de seguridad para el desempeño de tareas, etc.), lo que refuerza en forma doble el principio de reducción de tareas. Es más, en general una manera fácil y rápida para conocer el grado de prefabricación de un proyecto es examinar la cantidad de residuos generados en la obra: a mayor cantidad de escombros, menor prefabricación.

El principio de reducción de tareas no sólo se materializa 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, elimina las acciones de medición, corte, clavado y ajuste de diagonales, reducción y encastre de pies derechos y encamisado posterior del tabique para recibimiento de terminación. La tarea de confección de diagonales y sus varias acciones asociadas se sustituyen por el solo clavado de placa arriostrante. Siguiendo el mismo contexto de diseño en madera, el uso de conectores metálicos en sustitución de ensambles y encastres entre piezas de madera (e.g. en confección de cerchas o en la unión de piezas en ángulo) reduce notablemente la cantidad de acciones de corte y ajuste. Un caso ejemplar es la unión entre vigas doble T con alma de placa contrachapada: rebajes de ala, confección de tacos de relleno para la zona de nudo, ensambles y fijación pueden ser eliminados y simplemente sustituidos por el uso de conectores. Otro caso lo constituyen los entresijos de madera y la necesidad de tender redes de instalaciones eléctricas o sanitarias. Típicamente, cuando los diámetros de los ductos son pequeños, una estrategia es sobredimensionar las vigas en un par de centímetros (la altura del ducto) y luego realizar cortes en la cara media de cada viga para el paso de la instalación, sin afectar su capacidad estructural. Una solución que respeta el mismo principio estructural, pero que aumenta la constructividad del detalle por reducción de las acciones de corte (que son de naturaleza compleja dado que deben ser exactos y alineados) es, por ejemplo, el uso de vigas dimensionadas estructuralmente y luego el clavado de listones entre ductos para alcanzar el nivel de piso. En el caso de ductos de mayor tamaño, usualmente el detalle consiste en perforar las cadenas en la fibra neutra, lo que también resulta complejo debido a la imperiosa necesidad de alineación exacta entre ellas. Un sencillo cambio en el diseño como la utilización de cruces de San Andrés en vez de cadenas sólidas permite eliminar la acción de perforación y reducir considerablemente la dificultad del detalle. En todos estos casos la constructividad del proyecto aumenta gracias a la reducción de tareas de construcción implícita en la simplificación del detalle constructivo, y no por aplicación de estrategias de prefabricación.

c. Principio de reducción de variabilidad de tareas de construcción

El principio de reducción de variabilidad de tareas es el tercer mecanismo de reducción de dificultad de construcción desde el diseño. La especificación de diseños con componentes estandarizados, la repetición de un mismo detalle constructivo o especificación de “familias” de detalles que compartan características comunes, el uso de componentes similares, la modulación geométrica y constructiva de los espacios y componentes, el uso de soluciones de diseño que se adapten a los productos disponibles en el mercado o la reducción de tipos de materiales, componentes y elementos dentro de obra, entre otros muchos otros ejemplos, son aproximaciones intuitivas al principio de reducción de variabilidad de tareas de construcción.

Desde el punto de vista analítico propuesto por el MADC, el principio se explica por el tercer mecanismo de reducción de dificultad, descrito en § 5.2.1.(3), según la cual la repetición de características de diseño idénticas o similares disminuye la dificultad total del proyecto, aceptando el paradigma de la curva de aprendizaje. En palabras más simples, consiste en preferir aquellos diseños cuyas tareas de construcción necesarias son similares, repetitivas y con menos variabilidad.

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 unitaria; 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 posibles.

Por ejemplo, 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 fundamenta en el paradigma de la curva de aprendizaje, según la cual, las organizaciones y las personas mejoran crecientemente su desempeño a medida que más tiempo invierten desarrollando la misma actividad. Esto se da tanto a nivel personal, dado como aprendizaje propio, como a nivel corporativo, en términos de aprendizaje organizacional y optimización de los recursos. Siguiendo el ejemplo anterior, los enfierradores mejorarán en calidad y velocidad de

desempeño progresivamente a medida que deban continuamente repetir el mismo diseño de armaduras, y dado que las tareas se mantienen invariables, requerirán menos supervisión durante el resto de la faena. Las dimensiones, diámetros, ángulos y geometrías son las mismas: no sólo el maestro se las aprende sino que resulta más fácil detectar un error por simple comparación. El maestro puede construir guías y plantillas, y dado que son tareas repetitivas, los ayudantes pueden confeccionar enfierraduras con la simple supervisión del maestro. Igual situación ocurre con los moldajes, hormigonado e incluso faenas como el vibrado. Los concreteros al cabo de dos o tres iteraciones ya habrán descubierto cuales son los nudos más complejos de vibrar y habrán desarrollado una técnica especial para ellos. En términos corporativos, la administración de la obra puede utilizar mejores herramientas y materiales, dado que su repetición amortiza el costo. Se optimiza el uso de la capacidad instalada y la inspección técnica se hace más eficiente, pues se puede recurrir a sistemas de control de gestión repetitivos. En general, la obra se hace más fácil de construir.

Este principio existe más o menos diluido en la literatura referenciado en diversas formas: “estandarización, modularización, repetición, normalización, unificación”, son conceptos que comparten este mismo principio como base, aunque no en forma exactamente igual. Como estrategias de mejora de la constructividad, son todas válidas.

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 estandarización es una estrategia de mejoramiento de constructividad que se fundamenta en el principio de reducción de variabilidad. A mayor cantidad de características de diseño que respeten un mismo estándar o norma, menor variabilidad en la tarea de construcción asociada. Por ejemplo, si en un proyecto se define un estándar general para revestimiento de muro según programa, independiente de las condiciones de ubicación o geometría de cada recinto, en obra las tareas de terminación se reducen a una gama conocida y las tareas específicas derivadas de las particularidades de cada recinto se eliminan.

La estandarización en arquitectura puede ser interna o con apego a normas definidas específicamente para un proyecto en particular, o externa, con apego a normas definidas por la industria en general. Por ejemplo, en un proyecto industrial que contemple varios galpones metálicos, la estandarización interna podría definir una norma para el diseño de cerchas metálicas basado en los materiales disponibles y en las condiciones de transporte. En cambio, si fuera estandarizado externamente, el diseño debería respetar alguna norma ya existente en la industria para el diseño de cerchas. Ambos enfoques son igualmente válidos: mientras en la primera opción la optimización de

recursos es mayor, se requieren mayores iteraciones constructivas para que el equipo constructor adquiera la pericia en ese diseño en particular. En el segundo caso, mientras el diseño puede no ser el más óptimo, el diseño es conocido por los fabricantes, quienes probablemente incluso ya tienen experiencia previa. Dependiendo de las condiciones del proyecto, de las características del equipo constructor, del tiempo disponible, del grado de comunicación (de los factores de constructividad, en realidad), una u otra opción puede ser preferible.

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. Por ejemplo, el diseño de la partición interior de un piso para oficinas es típicamente un ejemplo del uso de modularización geométrica como estrategia de mejoramiento de constructividad. Estos recintos requieren una gran densidad de tabiques, puntos de iluminación, centros eléctricos, instalaciones de aire, tendido de redes y mueblería, que en un diseño libre, ocasionaría cientos sino miles de colisiones, encuentros indeseados y descoordinación de elementos que llevaría a una inusitada cantidad de acciones constructivas de cortes, ajustes, extensiones, desviaciones y correcciones, multiplicando por varias veces la complejidad, duración y costo de construcción. La falta de coordinación sería la regla y no la excepción. Respecto a la segunda estrategia de mejoramiento de constructividad, el uso de módulos constructivos, esta usualmente se da por prefabricación, es decir, aquella que forma unidades físicamente y funcionalmente independientes, bi o tridimensionales, que se fabrican en una planta y luego se traslada al sitio de obra donde se montan y articulan con otros módulos. Campamentos industriales u hospitales de emergencia son ejemplos de construcción modular prefabricada. Sin embargo, no es el único caso. En un proyecto educacional, todas las salas de clases son muy similares, por lo que perfectamente podrían normalizarse y constituirse en un módulo de diseño, con todas sus características idénticas. En obra, los equipos constructores tendrían que construir cierta cantidad de módulos de salas de clases *in situ*, con todos los beneficios de la repetición, pero sin un solo centímetro de construcción prefabricada.

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. Según este principio, proyectos en los cuales la determinación de las tareas de construcción es flexible para el constructor —entre una cierta gama de posibilidades que con diferentes procesos constructivos obtienen los mismos resultados de diseño— tienen mayor grado de constructividad. El principio de flexibilidad no significa diseñar sin definir las tareas de construcción; significa privilegiar aquellos diseños que tienen más de una manera de construirse.

Desde el punto de vista analítico propuesto por el MADC, el principio se explica por el cuarto mecanismo de reducción de dificultad, descrito en § 5.2.1.(4), según la cual la elección de características de diseño que permitan mayor cantidad de posibilidades para el constructor de elección de tareas de construcción para obtener un mismo resultado final, implican finalmente una menor dificultad de construcción, dado que el constructor por definición optimizará la opción que tenga menor dificultad unitaria, *ceteris paribus*. Este mecanismo y consecuente principio de construcción se basa en la presunción de conocimiento experto.

La presunción del conocimiento experto reconoce que el conocimiento 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. Por su propia naturaleza, los constructores privilegiarán el mejor y eficiente desarrollo de la obra, anteponiendo estas preocupaciones por sobre otras, como por ejemplo, la calidad arquitectónica de un edificio (*vid.* § 1.1.2.a.). Por supuesto, es imposible asegurar que esto sea así siempre, pero se presume que es el criterio general. Basado en esta presunción, el principio de flexibilidad de elección 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 otras palabras, el principio de flexibilidad de elección de tareas de construcción clama para que los diseñadores hagan dos cosas: (1) aumentar aquellas características de diseño que pueden ser construidas de varias maneras posibles y (2) dejar que la elección final sea tomada por el constructor.

Por ejemplo, en un proyecto de vivienda panelizada en madera, el lugar donde se fabriquen los paneles es indiferente al resultado final. Entre otras opciones, se podría: (1) (pre)fabricar los paneles en una planta industrial con ambiente altamente controlado y trasladarlos a obra; (2) prefabricar los paneles en el terreno, en una planta cercana a pie de obra con ambiente semi controlado y luego moverlos al punto exacto de montaje; o (3) fabricar los paneles exactamente en su posición final a través de un procedimiento constructivo clásico. Si en todos los escenarios los paneles son fabricados

cumpliendo exactamente los requisitos de diseño y con los mismos estándares de calidad (*i.e.* materiales, geometría, tolerancias, etc.), la decisión final de dónde fabricarlos depende de las condiciones y recursos de construcción específicos del proyecto, más que del diseño mismo o resultado final. Por ejemplo, la opción de prefabricación industrializada permite mayor grado de control sobre los procesos y mayor eficiencia en la producción seriada, pero requiere infraestructura especial (*i.e.* espacio para la fabricación, almacenamiento de materiales y paneles, etc), y condiciones propicias para el traslado (*i.e.* buenas vías de accesibilidad, recursos para la carga y descarga, transporte adecuado, etc.). En el otro extremo, la opción de fabricación en su posición final evita el traslado, reduce el espacio de almacenamiento y elimina la necesidad de infraestructura para prefabricación; pero requiere mayor supervisión y control para el aseguramiento de calidad, lo que aumenta el riesgo de demoras y retrasos. El constructor seleccionará la opción que mejor se ajuste a su disponibilidad de recursos y condiciones de obra: probablemente si el proyecto corresponde a una zona de mal clima donde el tiempo de construcción al aire libre debe reducirse al mínimo y, el constructor optará por la prefabricación en industria; si las condiciones de accesibilidad al terreno para vehículos grandes son complejas pero el terreno mismo tiene mucho espacio disponible, el constructor optará por prefabricación a pie de obra; o si no existen instalaciones industriales disponibles y la mano de obra calificada para supervisión es abundante, el constructor optará por la opción de fabricación tradicional. La oportunidad de elegir es lo que hace que la decisión se optimice y la dificultad de construcción disminuya. Desde el punto de vista del diseño, la constructividad se aumenta al especificar un panel que pueda ser fabricado en los tres escenarios y que no tenga características específicas que obliguen a optar por una u otra opción.

El principio de flexibilidad de elección de tareas de construcción exige a los diseñadores a renunciar al control total del proyecto, lo que, aunque sensato, es todavía discutido en ciertos sectores. El arquitecto ya no es el *architekton* de la antigüedad o *master maçon* del Medioevo que controlaba desde la elección de muebles y tapices hasta la dirección de los obreros. En la industria actual, los constructores pueden tomar mejores decisiones sobre los procesos de construcción, y la esencia de este principio es darles aquel poder tanto como sea posible, sin sacrificar las características del producto final. El principio de flexibilidad reconoce que los arquitectos son los guardianes del producto final y su desempeño (*vid.* § 1.1.2.a.), pero les demanda que sean flexibles en las demás decisiones.

Una probable fuente de confusión del principio de flexibilización está en su malinterpretación como una suerte de principio de indefinición de tareas por parte del diseño. “*Este es el diseño y luego verá el constructor como lo construye*”, aludiendo principio de flexibilización es una muy alejada, equivocada y negativa interpretación. La indefinición de tareas y traspaso de toda la responsabilidad al constructor cae en el equívoco de la división de tareas sin integración. Indefinición significa diseñar sin tomar en cuenta la realidad del proceso constructivo, sin considerar los factores de

construcción y eso es justamente lo que la constructividad trata de evitar. 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, y dentro de esas opciones, dar al constructor la posibilidad de optar por la más eficiente según su propio criterio.

El principio de flexibilización de elección de tareas de construcción puede ser aplicado en todas las etapas de desarrollo de proyecto con diferente énfasis y nivel de detalle, y con o sin la participación directa del equipo constructor. En un escenario ideal, el principio se aplica en un contexto gradual y participativo. Por ejemplo, en una primera etapa de diseño el proyecto podría oscilar entre utilizar prefabricación como estrategia principal o no. El equipo constructor es requerido para decidir que opción es más eficiente para el diseño propuesto, considerando los recursos de construcciones disponibles. El equipo diseñador continuaría desarrollando el proyecto y llegado cierto punto de avance, nuevamente se encontraría frente a un diseño que permite diferentes posibilidades de construcción. Otra vez, el equipo constructor es requerido para decidir, esta vez, el largo de las vigas principales: ¿vigas más largas y unitarias, pero más difíciles de trasladar, o vigas más cortas y fáciles de mover, pero con más uniones en obra? Esta dinámica de participación requiere una interacción continua y constante entre un equipo diseñador propositivo de muchas opciones y un equipo constructor analítico y resolutivo. Sin embargo, como es obvio, no siempre es posible. En una innumerable cantidad de contextos profesionales, los equipos diseñadores deben desarrollar los proyectos en forma aislada o con muy baja participación de profesionales de obra. Es precisamente en este contexto menos favorable, cuando el principio de flexibilidad se hace aún más crítico. Es tendencia general entre los diseñadores enfrentados a estos encargos la definición absoluta de todos y cada uno de los más mínimos detalles de proyecto, incluyendo la definición de tareas de construcción. A mayor definición, menos incertidumbre y por tanto mayor control sobre el resultado final. No obstante, el precio que se paga es la falta de optimización potencial debido a falta del conocimiento experto de construcción. Aplicando el principio de flexibilidad, más opciones de realización pueden plantearse respondiendo al mismo producto final —lo que no es sinónimo de indefinición, como hemos visto—, lo que permitiría al equipo constructor decidir y facilitar el desarrollo de obra. Incluso en contextos donde tradicionalmente se exige la mayor definición posible, por ejemplo, en proyectos cuya construcción será licitada públicamente, la aplicación del principio de flexibilidad acarrearía mayor eficiencia. Si un proyecto licitado planteara diferentes opciones de construcción, cada equipo postulante podría elegir la más conveniente según sus propios recursos, experiencia y conocimiento, disminuir la dificultad de construcción y consecuentemente los costos. Una licitación así sería incluso más efectiva.

§ 6.4. Ejemplos de pautas y reglas de constructividad

§ 6.4.1. Pautas de constructividad

113

Las pautas de constructividad son recomendaciones de diseño que 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:

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.

A continuación se entregan cuatro ejemplos de pautas de constructividad, derivados de recomendaciones comunes que se pueden encontrar en la literatura técnica relacionada (Adams, 1990; Ferguson, 1999), pero que han sido adaptados a los criterios anteriores de forma y fondo:

Ejemplo 1: “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.”

- (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.

Ejemplo 2: “En suelos peligrosos, inestables, de baja calidad o húmedos, disminuir la proporción de volumen bajo cota cero para disminuir la necesidad de tareas auxiliares o de seguridad en la fase de excavaciones”.

- (1) Refiere a la decisión de diseño de volumen bajo cota cero.
- (2) Es específico en cuanto a la proporción de volumen. No se refiere a tipo de sistema estructura y fundaciones asociadas.
- (4) En contextos de suelos peligrosos, inestables, de baja calidad o húmedos.
- (5) Indicadores posibles: proporción de volumen bajo cota, excavaciones necesarias.
- (5) El objetivo es reducir las excavaciones (peligrosas) y sus tareas auxiliares relacionadas.

Ejemplo 3: “En climas húmedos, con vientos o precipitaciones, plantear una envolvente independiente que pueda ser instalada lo más prematuramente posible a fin de lograr un pronto cerramiento en obra que dé control y estabilidad al ambiente de trabajo”.

- (1) Refiere a la decisión de diseño del tipo de envolvente y su sistema constructivo.
- (2) Es específico en cuanto al sistema de instalación de la envolvente.
- (4) En climas húmedos, con vientos o precipitaciones.
- (5) Indicadores posibles: número de días para el cerramiento de obra, o proporción de fachada que puede ser cerrada a una cierta fecha.
- (5) El objetivo es tener un ambiente de trabajo controlado, libre de afecciones climáticas.

§ 6.4.2. 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.

115

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 vibradoras del hormigón.