



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA



# Máster Universitario de Estructuras

2017/2018

## EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DEL DAÑO Y CALIDAD DE ESTRUCTURAS

*Profesores: **RUS CARLBORG, GUILLERMO***

*Alumna: **NUNES TRIPARI NOGUEIRA, MARIANY***

Marzo de 2018

# Aplicación de la metodología de diseño axiomático en la construcción.

## *Applying axiomatic design methodology in construction*

En este trabajo será abordará de algunos elementos conceptuales y prácticos de la metodología de diseño axiomático para un caso posible en la construcción. El estudio se orientó hacia la definición de requerimientos funcionales (FR), parámetros de diseño (DP) y variables de proceso (PV).

## 1 - Introducción

La evaluación no destructiva tiene un papel muy importante para la calidad de los trabajos y diseños de la construcción civil. Aunque se ha dado grandes pasos, la calidad en el diseño de proyectos de la construcción civil todavía es un tema irresoluto.

Cuando se desarrolla un proyecto se pretende contribuir a la sociedad en la satisfacción de sus necesidades. El desarrollo involucra actividades como la identificación del problema a partir de un conjunto difuso de expresiones lingüísticas de sus potenciales usuarios, seguido de una etapa con elevado componente creativo, en donde el diseñador genera las alternativas posibles de solución, y esto a su vez es seguido por la etapa de evaluación, donde a partir de la confrontación entre alternativas posibles y especificaciones definidas se llega a una conclusión sobre cuál puede ser la mejor alternativa.

De hecho, se puede justificar la evaluación no destructiva de proyectos de construcción, para facilitar el diseño y la ejecución de los proyectos

En el desarrollo integral de un proyecto, la etapa inicial comprende la definición clara del tipo a diseñar; en este sentido, en un proceso de diseño se generan alternativas, a partir de la identificación de los atributos de diseño claves y los niveles de estos atributos, y de allí se generan, las posibles alternativas de diseño.

El diseño en proyecto de la construcción tiene un modelo racional que empieza con el estudio de los requisitos → diseño → implementación → verificación → mantenimiento.

La susceptibilidad del presupuesto del proyecto a las decisiones tomadas durante la etapa del planeamiento implica que se han de dedicar una buena parte de los recursos a la creación, generación y evolución de las soluciones conceptuales propuestas, ya que los cambios de última hora en un proyecto de construcción aumentan drásticamente el presupuesto del proyecto y a la vez repercuten en el presupuesto de mantenimiento de la obra en cuestión. Tenemos que tener cuidado con las decisiones basadas en la experiencia de los profesionales pues ellas pueden llevar a algunos resultados desagradables como por ejemplo finalización de la obra fuera del plazo estipulado, aumento en el presupuesto del proyecto y quizá la insatisfacción del cliente por eso, a tomar decisiones, es importante tener capacidad de transformar las necesidades del cliente en un conjunto mínimo de objetivos, creatividad para generar soluciones plausibles y capacidad para analizar y evaluar soluciones en función de su presupuesto.

Basándose en eso, se ha propuesto el uso del método de Diseño Axiomático para proyectos de construcción civil como medio de satisfacer las necesidades generales. Ese método ha sido usado para aumentar la calidad en varios procesos.

## 2 - Diseño Axiomático

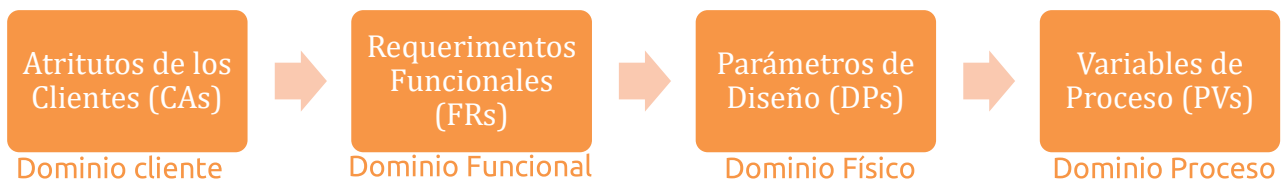
Un diseño axiomático es una metodología de diseño de sistemas que utiliza métodos matriciales para analizar sistemáticamente la transformación de las necesidades de los clientes en requisitos funcionales, parámetros de diseño y variables de proceso. En concreto, los FR están relacionados con los DP: 
$$\begin{bmatrix} RF_1 \\ RF_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PD_1 \\ PD_2 \end{bmatrix}$$

El método obtiene su nombre de su uso de los principios de diseño o axiomas del diseño (es decir, dado sin pruebas) que rigen el análisis y la toma de decisiones en el desarrollo de productos de alta calidad o diseños de sistemas.

La metodología fue desarrollada por el Dr. Suh Nam Pyo en el MIT, en el Departamento de Ingeniería Mecánica desde los años 1990. Se celebraron una serie de conferencias académicas para presentar la situación actual de la metodología. La Conferencia Internacional sobre Diseño Axiomático más reciente (ICAD por sus siglas en inglés) se celebró en Portugal, en el año 2009.

El diseño axiomático se fundamenta en los siguientes conceptos:

1. Existencia de cuatro dominios en el mundo del diseño: dominio del usuario, dominio funcional, dominio físico y dominio del proceso; cada uno de éstos, con su vector característico: atributos del usuario, requerimientos funcionales, parámetros de diseño y variables de proceso, respectivamente. El proceso de diseño en conjunto incluye el procesamiento continuo de información entre y dentro de los cuatro dominios identificados como muestra en la figura abajo.



2. Las alternativas de solución son creadas por la descripción en detalle de los requerimientos especificados en un dominio para establecer los parámetros característicos en el dominio siguiente. La relación entre los dominios del usuario y funcional es definida como el concepto de diseño; la relación entre los dominios funcional y físico es el diseño de producto; la relación entre los dominios físico y de proceso corresponden al diseño del proceso.
3. La existencia de restricciones o valores límites, especificaciones o fronteras que una solución de propuesta de diseño debe satisfacer. Son definidas por el diseñador y se diferencian de los FR, en que las restricciones no tienen que ser independientes de otras restricciones o FR.
4. El proceso de mapeado o relación entre dominios, puede ser expresado matemáticamente en términos de los vectores característicos que definen el objetivo del diseño y la solución de diseño.
5. La salida de cada dominio desarrolla los conceptos de lo abstracto a información detallada en una forma jerárquica priorizada. La descomposición jerárquica en un dominio puede no ser llevada a cabo independientemente de otros dominios, así la descomposición sigue una relación en zigzag entre dominios adyacentes.
6. La existencia de dos axiomas de diseño provee una base racional para evaluar las alternativas de solución propuesta y la subsecuente elección de la mejor alternativa. Los dos axiomas se han descrito en los siguientes términos:

Axioma 1: El axioma de la independencia. Mantiene la independencia de los requisitos funcionales (RF).

Axioma 2: El axioma de la Información. Minimiza el contenido de información del diseño.

Cuantitativamente se puede definir la información como:  $I = \log_2 \left( \frac{\text{rango}}{\text{tolerancia}} \right)$ ,

donde:  $\left( \frac{\text{rango}}{\text{tolerancia}} \right)$  es la probabilidad de éxito

Entonces, para satisfacer el cliente, el diseñador tiene que definir los FR apropiados del problema. Lo mapeo de los DP depende de la creatividad del ingeniero y son considerados como requisitos para la implementación del PV.

La aplicación del axioma de independencia se puede describir en términos de una matriz de diseño. La DM muestra la relación entre los FR y DP a un nivel dado de la calidad del diseño. La matriz de diseño [A] resulta de una ecuación de diseño tal como la ecuación 1, de donde se establece que el proceso de mapeado puede ser expresado matemáticamente.

$$\begin{array}{ccc} \begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_n \end{Bmatrix} & = & [A] \begin{Bmatrix} DR_1 \\ DR_n \end{Bmatrix} \\ \downarrow & & \downarrow \\ \text{Vector} & & \text{Matriz de} \\ \text{requerimientos} & & \text{diseño del} \\ \text{funcionales} & & \text{producto} \\ & & \downarrow \\ & & \text{Vector} \\ & & \text{parámetros} \\ & & \text{de diseño} \end{array} \quad (1)$$

De la misma forma, los DP establecidos en el dominio físico es un vector, así como las PV del dominio del proceso para establecer la ecuación del proceso, tal como se presenta en la ecuación 2.

$$\begin{array}{ccc} \begin{Bmatrix} DR_1 \\ DR_n \end{Bmatrix} & = & [B] \begin{Bmatrix} PV_1 \\ PV_n \end{Bmatrix} \\ \downarrow & & \downarrow \\ \text{Vector} & & \text{Matriz de} \\ \text{parámetros de} & & \text{diseño del} \\ \text{diseño} & & \text{proceso} \\ & & \downarrow \\ & & \text{Vector} \\ & & \text{variable de} \\ & & \text{proceso} \end{array} \quad (2)$$

La aplicación del concepto de ingeniería concurrente requiere que los procesos de mapeado y descomposición entre dominios se realicen simultáneamente, verificando el cumplimiento de los dos axiomas de diseño.

Cada línea de la ecuación del vector puede escribirse de acuerdo con la ecuación 3.

$$FR_i = \sum_j A_{ij} DP_j \quad (3)$$

La matriz de diseño [A], tiene la forma:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Cada elemento A en la ecuación 4 de la matriz asocia un componente del vector FR a un componente del vector DR. En términos generales el elemento  $A_{ij}$  se puede expresar según la ecuación 5, como:

$$A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \quad (5)$$

Cuando se evalúa el cumplimiento del axioma de independencia, la matriz resultante debe ser diagonal o triangular, ésta puede representarse con el valor X cuando existe un fuerte efecto de un DP sobre un FR, y un valor O indica que no hay efecto relativo a la tolerancia asociada con el FR.

Con relación al axioma de información, su definición se basa en un concepto de probabilidad que busca cuantificar la cantidad de conocimiento necesaria para alcanzar un FR o un DP, según el dominio que se esté evaluando. En la medida en que se requiere un mayor nivel de conocimiento, se ingresa a niveles más complejos de información, por lo cual, entre menor contenido de información involucre un diseño, mejor será esta propuesta.

El contenido de información es definido en términos de probabilidad "p", donde este concepto se asocia con el logro o alcance de los FR definidos; de acuerdo con la ecuación 6, el contenido de información es cero cuando la probabilidad es igual a uno; considerando que el contenido de información tiene la unidad "bit", se toma el logaritmo en base dos para su determinación.

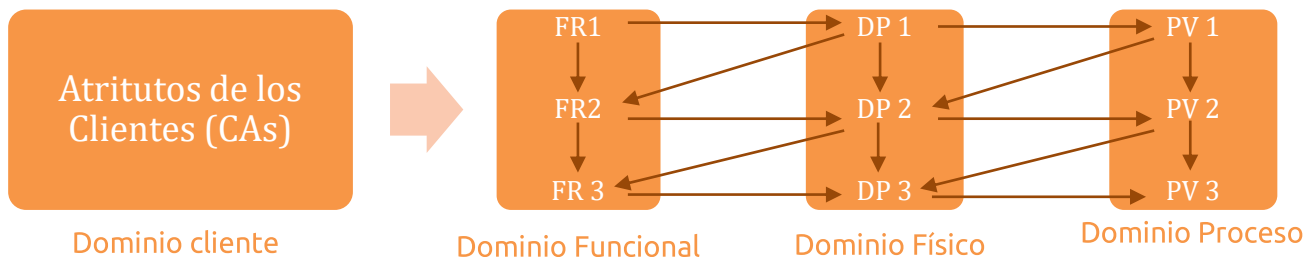
$$I = \log_2(1/p) \quad (6)$$

Esta expresión puede especificar que el contenido de información es simplemente el logaritmo del rango definido para una variable, dividido por su tolerancia, de esta forma el contenido de información puede escribirse como aparece en la ecuación 7.

$$I = \log_2(\text{rango}/\text{tolerancia}) \quad (7)$$

Una vez definido varias soluciones, se hace uso del Axioma de la Información para determinar la mejor solución del definido, sabiendo que la mejor solución es la que tiene la mínima información.

Todo lo anterior puede estar definido mediante el árbol de diseño axiomático simplificado mostrado abajo:



### 3 – Aplicación: Parking de 1 planta en un Shopping

Con el fin de evaluar la calidad en el proyecto de una construcción se propuso evaluar un diseño de una posible obra de construcción de un parking de una planta para un shopping con el método de diseño axiomático.

El trabajo solo trata de definir las posibles soluciones de un problema de diseño y su relación entre los varios dominios para aplicar el método de diseño axiomático y puede ser dividido en las siguientes etapas:

1. Identificación de las necesidades y problemas del cliente;
2. Definición de los problemas para satisfacer los requerimientos funcionales (FR) del cliente en el dominio funcional y sus limitaciones;
3. Plantear las soluciones descritos por los parámetros de diseño (DP) en el dominio físico;

4. Análisis de las propuestas en función de las Axiomas de independencia e información, cumpliendo todas las restricciones, es decir, definir la solución óptima.
5. Integración del sistema propuesto, garantizando el cumplimiento de las restricciones, es decir, revisar la solución propuesta.

Las etapas citadas son muy importantes para que el diseño se realice de manera adecuada.

Definiendo el  $Dp_i$  del domino funcional que da respuesta al dominio cliente

$DP_1$ : Parking abierto

El primer parámetro  $FR_i$  fue mapeado con el **dominio funcional**:

$FR_1$ : Parking para 300 coches

Una vez definido los elementos del primer nivel del árbol axiomático, se puede descomponer el  $FR_1$  en varios  $FR_{1jkl}$ , separándolos en niveles 1, 2, 3 y 4:

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
---------	---------	---------	---------

$FR_1$ . Parking para 300 coches

$FR_{1.1}$ . Facilitación de su explotación

$FR_{1.1.1}$ . Dar un aspecto visual agradable

$FR_{1.1.1.1}$ . Pantalla para los vehículos aparcados

$FR_{1.1.2}$ . Facilita la protección contra el fuego

$FR_{1.1.2.1}$ . Confinar el fuego

$FR_{1.1.2.2}$ . Medios para apagar un incendio

$FR_{1.1.3}$ . Dar seguridad para los usuarios

$FR_{1.1.3.1}$ . Facilitar la visibilidad

$FR_{1.1.3.2}$ . Proveer de barreras perimetrales

$FR_{1.1.3.3}$ . Garantizar la seguridad personal de los usuarios

$FR_{1.1.3.4}$ . Restringir el acceso al garaje

$FR_{1.1.4}$ . Dar integridad estructural del edificio del parking

$FR_{1.1.4.1}$ . Diseño para obra de largo uso

$FR_{1.1.4.2}$ . Facilitación del mantenimiento

$FR_{1.1.4.3}$ . Resistir las cargas verticales

$FR_{1.1.4.4}$ . Resistir las cargas laterales

$FR_{1.2}$ . Satisfacer la accesibilidad al garaje

$FR_{1.3}$ . Usar la superficie de manera optima

$FR_{1.4}$ . Facilitar espacio para el mantenimiento

$FR_{1.5}$ . Facilitar espacio para la circulación

Cada uno de los parámetros  $FR_{ijkl}$  esta mapeada con las siguientes soluciones del **dominio físico**:

**DR 1. Parking abierto**

**DR 1.1. Número de plantas por la restricción de espacio**

**DR 1.1.1. Arquitectura**

**DR 1.1.1.1. Diseño arquitectónico**

**DR 1.1.2. Proveer de un sistema anti fuego**

**DR 1.1.2.1. Colocación de puntos de agua**

**DR 1.1.2.2. Instalación de espesores**

**DR 1.1.3. Proveer de un sistema de seguridad**

**DR 1.1.3.1. Uso de sistema de iluminación artificial**

**DR 1.1.3.2. Instalación de un muro de parapeto**

**DR 1.1.3.3. Contratar un servicio de Vigilancia**

**DR 1.1.3.4. Control del acceso al garaje**

**DR 1.1.4. Dar un sistema estructural**

**DR 1.1.4.1. Uso de hormigón de alta resistencia**

**DR 1.1.4.2. Sistema de drenaje**

**DR 1.1.4.3. Uso de tableros pos tensados**

**DR 1.1.4.4. Uso de un sistema rígido**

**DR 1.2. Numero de entrada y Salidas**

**DR 1.3. Orientación de plazas del parking**

**DR 1.4. Ancho de cada Plaza de estacionamiento**

**DR 1.5. Ancho de un módulo de estacionamiento**

Los niveles más bajos del dominio físico tienen los datos necesarios para definir las especificaciones, para hacer los dibujos para ejecución del parking, y también permiten el análisis y la evaluación del sistema de circulación, resistencia de la estructura, seguridad contra incendios y otros.

Al comparar los dominios funcional y físico, se fija que no se puede definir el dominio funcional sin tener en cuenta el dominio físico, ya que las soluciones dado pueden depender de cómo está descompuesta el dominio funcional.

Las matrices de diseño, tiene las formas respectivamente para cada nivel:

$$\begin{bmatrix} FR11 \\ FR12 \\ FR13 \\ FR14 \\ FR15 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & x & 0 \\ 0 & 0 & x & 0 & x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP11 \\ DP12 \\ DP13 \\ DP14 \\ DP15 \end{bmatrix}$$

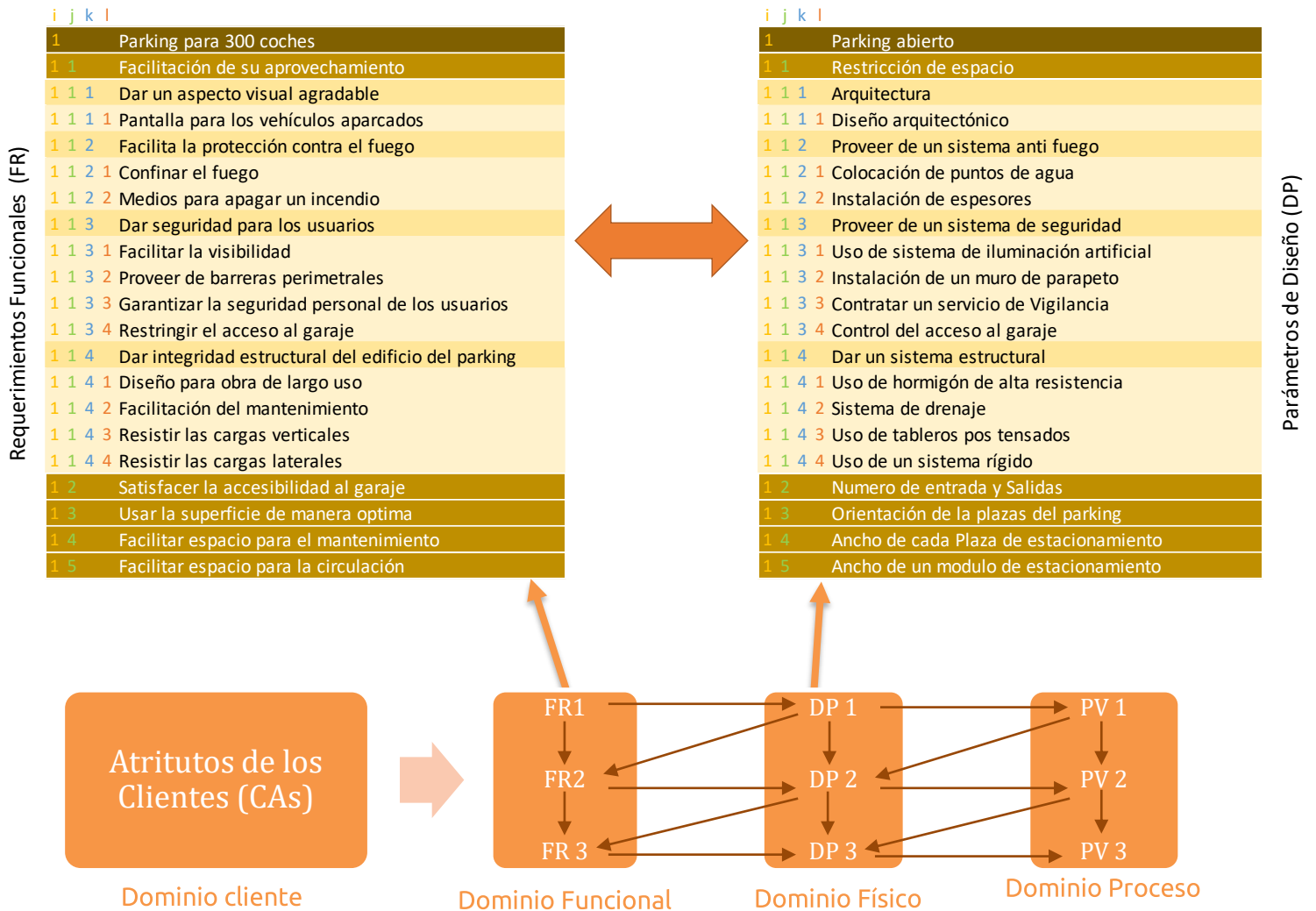
Nivel 2

$$\begin{bmatrix} FR111 \\ FR112 \\ FR113 \\ FR114 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP111 \\ DP112 \\ DP113 \\ DP114 \end{bmatrix}$$

Nivel 3

$$\begin{bmatrix} \text{FR1111} \\ \text{FR1121} \\ \text{FR1122} \\ \text{FR1131} \\ \text{FR1132} \\ \text{FR1133} \\ \text{FR1134} \\ \text{FR1141} \\ \text{FR1142} \\ \text{FR1143} \\ \text{FR1144} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & x & 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & x & 0 & x \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & x & x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{DP1111} \\ \text{DP1121} \\ \text{DP1122} \\ \text{DP1131} \\ \text{DP1132} \\ \text{DP1133} \\ \text{DP1134} \\ \text{DP1141} \\ \text{DP1142} \\ \text{DP1143} \\ \text{DP1144} \end{bmatrix}$$

Nivel 4





### 4 - Conclusión

---

Para la realización de un proyecto de construcción civil hace falta determinar un diseño más detallado y realizar una buena planificación de la obra.

Como abortado, el diseño axiomático y sus conceptos básicos han sido combinados con la idea de permitir a los expertos el diseño y la construcción del proyecto de manera más eficaz ya que permite la evaluación de varias alternativas antes de su realización.

Es válido destacar también que se puede utilizar los elementos aislados de una estructura con objetivo de tener una ejecución más eficaz ya que se puede reducir el tiempo usado en la evaluación de las alternativas propuestas por el ingeniero. El uso de diseño axiomático aun es un tema pendiente para la construcción.

El uso del diseño axiomático es la clave para la reducción de los tiempos en la hora de la realización de los proyectos ya que facilita cuanto al descarte de soluciones propuestas no viables antes de que se cometa al diseño preliminar reduciendo el uso de recursos.

### 5- Referencias bibliográficas

---

Es.wikipedia.org. (2018). *Diseño axiomático*. [online] Available at: [https://es.wikipedia.org/wiki/Dise%C3%B1o\\_axiom%C3%A1tico](https://es.wikipedia.org/wiki/Dise%C3%B1o_axiom%C3%A1tico) [Accessed 1 Mar. 2018].

Gebala, D. and Suh, N. (1992). An application of axiomatic design. *Research in Engineering Design*, 3(3), pp.149-162.

KRISHNAMOORTHY, C. and MOSI, D. (1979). A SURVEY ON OPTIMAL DESIGN OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURAL SYSTEMS. *Engineering Optimization*, 4(2), pp.73-88.