



Tecnura

ISSN: 0123-921X

tecnura@udistrital.edu.co

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Colombia

VILLEGAS FLORES, NOÉ; PARAPINSKI DOS SANTOS, ANA CAROLINA
Análisis de indicadores para determinar el grado de sostenibilidad en concretos especiales
Tecnura, vol. 17, núm. 38, octubre-diciembre, 2013, pp. 12-25
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257028384002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Análisis de indicadores para determinar el grado de sostenibilidad en concretos especiales

Analysis of indicators that determine the sustainability level in special concretes

NOÉ VILLEGAS FLORES

Ingeniero civil, doctor en Ingeniería de la construcción. Docente de la Universidad Federal de la Integración Latinoamericana – UNILA. Foz de Iguazú, Brasil.
Contacto: noe.flores@unila.edu.br

ANA CAROLINA PARAPINSKI DOS SANTOS

Ingeniera civil, doctora en Ingeniería de la construcción. Docente de la Universidad Federal de la Integración Latinoamericana – UNILA. Foz de Iguazú, Brasil.
Contacto: ana.santos@unila.edu.br

Fecha de recepción: 30 de enero de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 15 de abril de 2013

Financiamiento: Universidad Federal de la Integración Latinoamericana

Palabras clave: concretos especiales, indicadores, MIVES, sostenibilidad.

Keywords: concrete, indicators, MIVES, sustainability.

RESUMEN

Existe una clara coincidencia que el concepto de sostenibilidad ha sido adoptado para otorgar el mayor grado de calidad a un producto o servicio y es con frecuencia asociado al medioambiente. Si bien, en ciertos entornos se han alcanzado diversos estándares de sostenibilidad, en el sector de la construcción se reduce a la incorporación de respuestas inmediatas sin generar un impacto significativo bajo este régimen social, económico y medioambiental. Este artículo ha permitido evaluar el grado de sostenibilidad de un concreto con ca-

racterísticas especiales. Se han tomado como base dos tipos de concretos, autocompactante y convencional. Se ha obtenido un árbol de requerimientos que ayude a tomar la decisión respecto al índice de valor buscado. Además se han obtenido las tendencias y parámetros que dan apoyo a la evaluación.

ABSTRACT

There is a clear agreement that the concept of sustainability has been used to provide the highest level of quality in a product or service whe-

re often it is associated with the environment. Although, in certain environments have achieved several standards of sustainability, in the construction sector the solutions are reduced to immediate answers without a significant impact on the social system, economic and environmental. This study has allowed assessing the sustainability of

concrete with special characteristics. Two types of concrete have been analyzed, self-compacting and conventional concrete. A tree of requirements has been proposed to support the process of decision maker regarding the index value. Moreover, trends and parameters have been obtained that support the assessment.

* * *

1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad es un parámetro relativo que se emplea, la mayoría de las ocasiones, para comparar productos o servicios. Cuando se desea cuantificar la sostenibilidad de dos productos diferentes, o con características similares, es necesario llevar a cabo procedimientos homogéneos que permitan evaluar dichos productos de forma técnica y con criterios de impacto ambiental y económico.

Hoy en día, la mayoría de los profesionales del sector de la construcción coinciden que las nuevas políticas de diseño y construcción de obras están sujetas a directrices de sostenibilidad [1-3]. Si bien, el sector de la construcción ha ido evolucionando en ese sentido, aún existe cierto “tradicionalismo” en el empleo de materiales y procesos constructivos. El uso continuo de materiales con grandes impactos ambientales y procesos de construcción poco eficientes, sigue siendo el mayor obstáculo para alcanzar la categoría de “construcción sostenible” [4].

Sin embargo, en los últimos años, las empresas han comenzado a comprender que el término “sostenibilidad” no solamente está articulado a aspectos ambientales, sino que también comprende factores inherentes a la reducción de tareas de producción y mejoramiento de la tecnología y sus procesos.

Por otro lado, las empresas productoras de cemento y concreto se han preocupado por elaborar

productos diseñados bajo propuestas que consideren todos los aspectos importantes y que garanticen el éxito del suministro y aplicación en obra con procesos más sostenibles.

Bajo ese contexto, el decidido compromiso con el medio ambiente y la innovación que la industria del concreto ha incorporado para aumentar la sostenibilidad de este, reduce notablemente el balance de consumos e impacto ambiental durante todo el ciclo de vida del material [5].

Ante la necesidad de minimizar el impacto medio ambiental asociado con la producción de concreto y atender los requerimientos constructivos de proyectos modernos de resistencia mecánica y durabilidad, ha adquirido cada vez mayor importancia el desarrollo de modelos y herramientas metodológicas que evalúen aspectos sostenibles bajo este contexto.

En este artículo se analiza un nuevo modelo de indicadores que permita medir el grado de sostenibilidad de concretos especiales en el sector de construcción. El estudio se realizó con base en la metodología “MIVES”, fundamentada en análisis de valor [6]. Se ha determinado el árbol de requerimientos para concretos con características especiales respecto a sus componentes (aditivos) y al desempeño mecánico en estado endurecido.

2. METODOLOGÍA

El presente proyecto se desarrolló a partir la metodología MIVES, cuyo acrónimo significa “Modelo integrado de cuantificación de valor para edificaciones sostenibles” [7-9]. Originalmente, la herramienta ha sido diseñada para evaluar alternativas del sector industrial, la cual considera las siguientes características:

- Define el problema resolver y los límites del sistema de la decisión a tomar.
- Produce un diagrama de toma de decisión estableciendo todos los factores que afectan el problema en forma de árbol de requerimientos.
- Establece funciones matemáticas que permiten convertir los indicadores de orden cuantitativo y cualitativo con relativa facilidad, bajo las mismas unidades y escalas.
- Mide variables cuantitativas y cualitativas de forma integrada y durante todo el ciclo de vida del producto.
- Prioriza las variables de forma concisa y coherente.
- Considera su estructura metodológica dissociada a las alternativas implicadas en la toma de decisión. Evita que la decisión se vea afectada por intereses ajenos al problema.

Para el caso en particular, el problema a resolver es determinar el mejor concreto con características especiales —adiciones— de acuerdo con criterios de sostenibilidad.

En la figura 1 se resume, de forma general, la metodología empleada para determinar el grado de sostenibilidad de un concreto especial. En la primera etapa, se define el problema y los límites del sistema son identificados, por ejemplo: reformar

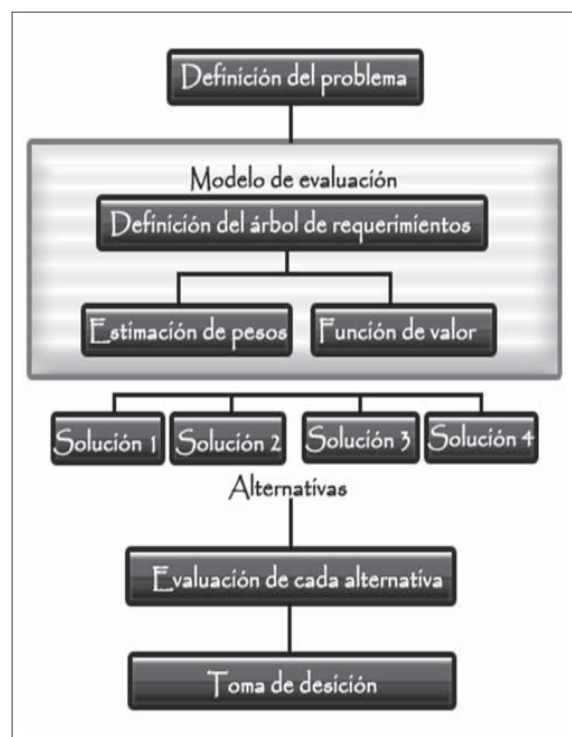


Figura 1. Algoritmo MIVES

Fuente: tomado de [11].

una vivienda, construir una carretera, diseñar un sistema de almacenamiento de agua, entre otros.

La segunda fase de la metodología se considera la de mayor importancia en el desarrollo del modelo. En esta etapa se plantea la estructura del “árbol de requerimientos”, el cual define de forma jerárquica las metas, criterios e indicadores de acuerdo con la tipología y las condiciones del proyecto. Así mismo, se priorizan cada una de las variables asignadas a través del proceso de jerarquía analítica (AHP, por sus siglas en inglés) [10].

Enseguida, se emplea el modelo matemático basado en la “función de valor”, el cual pretende transformar variables de diferentes unidades a una sola unidad adimensional. Este procedimiento permite evaluar aspectos con un mayor sentido físico y de fácil medición.

2.1 Concepción del modelo

El modelo considera una estructura triaxial, la cual corresponde a tres ejes de evaluación denominados: objetivos, componentes y ciclo de vida del producto.

El eje de objetivos representa el primer nivel jerárquico donde se reflejan las necesidades generales que el producto debe cumplir bajo estándares sostenibles. Por ejemplo, para un nuevo material, se pueden considerar aspectos como: funcionalidad, economía, estética, medioambiental, entre otros. En el eje de componentes se consideran cada uno de los elementos que serán evaluados en el modelo. Este eje es dividido de acuerdo con las necesidades de cada estudio. El nivel de detalle depende esencialmente de la profundidad del estudio que se lleve a cabo.

Finalmente, el eje temporal permite evaluar el producto mediante diferentes etapas del ciclo de vida, desde la concepción del proyecto hasta su reúso o reciclaje.

La figura 2 muestra la concepción de los tres ejes. La ventaja de este planteamiento metodológico es que se tiene el enfoque general del problema a partir del planteamiento de los tres ejes, así como, la perspectiva en cada eje, lo que supone los distintos puntos de vista en la toma de decisión.

En ese sentido, la valoración global del producto no es necesariamente la misma que la suma de las valoraciones de los cubos mostrados en la figura 2, ya que las condiciones de cada uno de estos cubos -o partes-, pueden ser diferentes.

2.2 Árbol de requerimientos

Los requerimientos son los aspectos del primer nivel del árbol que se consideran en la decisión. En el caso de un estudio de sostenibilidad se

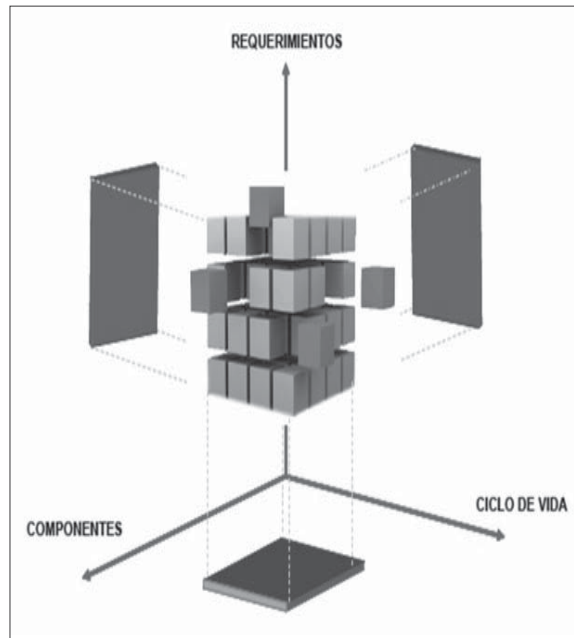


Figura 2. Estructura del modelo triaxial

Fuente: tomado de [11].

consideran los aspectos económicos, sociales y medioambientales que configuren el ámbito.

En general, se recomienda no incorporar demasiados aspectos en un solo nivel y en un mismo grupo homogéneo, ya que puede diluir el resultado de los más importantes [12]. De modo que es necesario, al inicio del planteamiento del problema, acotar estos aspectos, o bien, el criterio de representatividad para poder incluir o excluirlos, siendo extensivo a todos los niveles del árbol -requerimientos, criterios e indicadores-.

La figura 3 representa -de forma general- el planteamiento jerárquico adoptado para este estudio. En primer lugar, se consideran los objetivos o requerimientos; en segundo lugar, los criterios -agrupan aspectos homogéneos- y los indicadores -variables a evaluar-.

La evaluación de cada uno de los indicadores por medio del modelo matemático permite obtener un “índice de valor (Iv)” para cada producto. Para

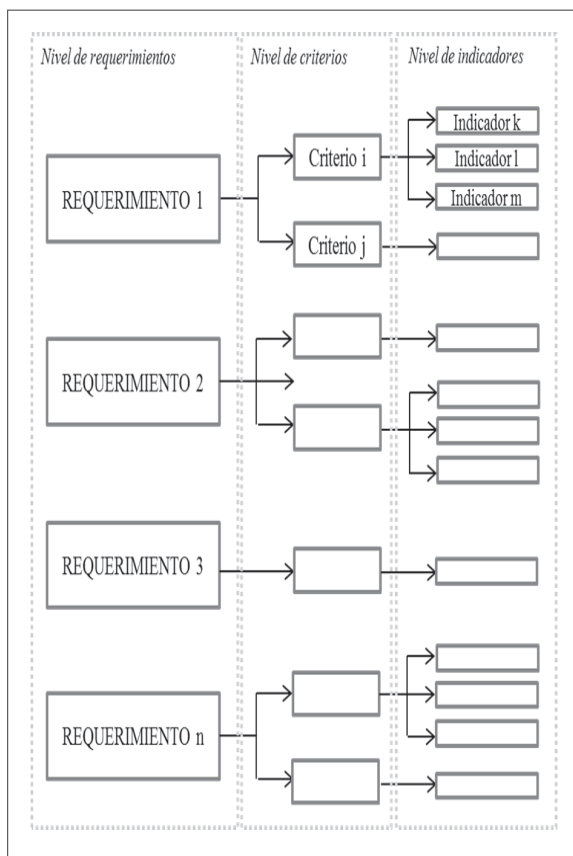


Figura 3. Planteamiento jerárquico del modelo

Fuente: elaboración propia

este caso en específico se obtendrá un Iv para cada concreto especial -con adición-. El producto -concreto- que obtenga el valor cercano a uno se considera como un producto con mayor grado de sostenibilidad. En cambio, el concreto que tienda a cero, será considerado como un producto con bajo grado de sostenibilidad e impacto negativo al aspecto medioambiental, social y económico donde ha sido desarrollado.

2.3 Algoritmo de evaluación para el estudio

La figura 4, refleja cuatro etapas de evaluación para determinar el grado de sostenibilidad de un concreto especial: definición del problema, aplicación del modelo, obtención del índice de valor y la toma de decisión.

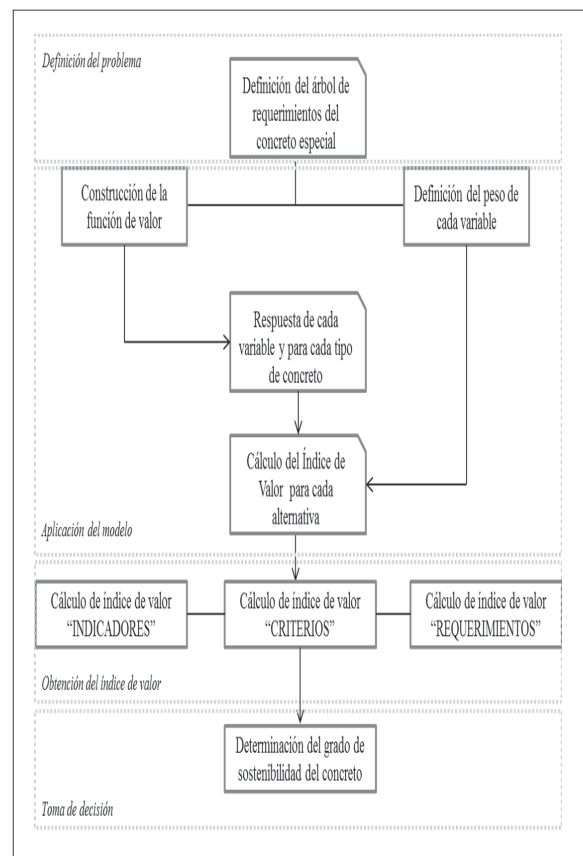


Figura 4. Algoritmo de evaluación

Fuente: elaboración propia

Construcción de la función de valor. En esta etapa, los diversos indicadores -tn, costo, impactos ambientales, tiempo, entre otros- son convertidos a una unidad adimensional. Se lleva a cabo mediante la función de utilidad con escala de 0 a 1 (0=satisfacción mínima; 1=máxima satisfacción).

Definición del peso de cada variable: se prioriza la importancia relativa de cada indicador mediante AHP (Analytical Hierarchy Process).

Respuesta de cada variable: se determina el desempeño de cada alternativa -concreto especial- asociado a cada indicador definido con anterioridad.

Cálculo del índice de valor para cada alternativa: cada alternativa es cuantificada en tres etapas: indicadores, criterios y requerimientos.

Determinación del grado de sostenibilidad de un concreto especial: se emplea el modelo matemático para cada eje: ciclo de vida, componentes y requerimientos.

3. CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA

Como se mencionó anteriormente, el estudio se centra en determinar una nueva propuesta para medir el grado de sostenibilidad de concretos especiales. En aras a definir los límites del sistema, se proponen dos tipos de concretos: concreto autocompactante y concreto convencional. Si bien, ya existen diversas experiencias internacionales sobre el estudio del concreto autocompactante [13-15], el desarrollo de estudios sobre la sostenibilidad que este tipo de concretos incorpora es más reducido.

Se ha propuesto el concreto autocompactante para este estudio debido a que este tipo de material integra características diferentes tanto en estado fresco como endurecido, respecto al concreto que se emplea de forma convencional.

En definitiva, este estudio enfatiza en proponer una estructura de evaluación -árbol de requerimientos - que permita medir el grado de sostenibilidad en concretos especiales -como material-. Para ello se ha definido una configuración general inicial, sin considerar los tipos de concretos en la generación del modelo para evitar sesgos al momento de tomar la decisión.

3.1 Alternativas

En los últimos años se ha observado un rápido desarrollo del concreto autocompactante dentro de la construcción. Desde sus inicios hasta ahora, se

ha realizado un proceso de implantación que ha servido para resolver dudas sobre diseño, fabricación y su puesta en obra.

Los principales avances realizados en concreto autocompactante y sus campos de aplicación, además del papel que han desempeñado los aditivos químicos en el desarrollo del concreto autocompactante, son parte fundamental en la fabricación del concreto, ya que gracias a ellos se consiguen una serie de características casi imprescindibles en el diseño y ejecución de estructuras de concreto.

Los aditivos químicos contribuyen a la evolución de los concretos. Dentro del campo de los concretos autocompactantes, han sido un elemento indispensable para su diseño e implantación. Los aditivos se usan para modificar favorablemente alguna de sus características, comportamiento o propiedad habitual del concreto, ya sea en su estado fresco o endurecido.

Al igual que el concreto convencional ha ido incorporando a su diseño diferentes elementos como las fibras, los agregados ligeros, entre otros. Para obtener propiedades adicionales, el autocompactante ha experimentado el mismo proceso de desarrollo respecto a esas mismas propiedades.

4. RESULTADOS

4.1 Definición del árbol de requerimientos

La tabla 1 presenta el árbol de decisión, el cual ha sido dividido en tres niveles jerárquicos: requerimientos, criterios e indicadores. La evaluación cualitativa es determinada por los dos primeros niveles -requerimientos y criterios-, siendo el tercer nivel -indicadores- el que otorga la evaluación cuantitativa. Es importante resaltar que en la configuración del árbol de requerimientos, no se debe exceder la cantidad de indicadores para

evitar diluir la importancia de estos durante el proceso de evaluación. Además, se han asignado los indicadores que realmente discriminan entre ambas alternativas que permita evaluar variables con un mayor grado de simplicidad y facilidad.

El nivel de “requerimientos” considera los siguientes aspectos: económico, ambiental, desempeño de las propiedades y el tiempo. Diversos autores [16-18] han evaluado varios proyectos en el sector de la construcción, lo cual supone una clara adopción del modelo en otros casos de aplicación.

En el primer requerimiento se han considerado dos aspectos fundamentales en el empleo de los concretos propuestos. Se han definido dos criterios: costo de elaboración y de colocación. El pri-

mero, supone que el costo entre ambos concretos se verá influenciado por la estructura granular del concreto autocompactante [13] y los ingredientes que lo componen. Además, y debido a sus propias características de consistencia, se verá reflejada una diferencia en los costos de colocación entre ambos materiales.

Desde el punto de vista medioambiental, se han definido dos criterios: el primero corresponde a un dato de entrada -capacidad del material para incorporar adiciones-; el segundo -generación de CO₂- ha sido planteado de forma que discrimine la cantidad de cemento necesario para producir un concreto especial y la reducción -o no- del equipo necesario durante la colocación del propio material.

Tabla 1. Propuesta de árbol de requerimientos (decisión) para concretos especiales

REQUERIMIENTO	CRITERIOS	INDICADORES
ECONÓMICO	Costo de elaboración	Costo de fabricación (Dólares / m ³)
	Costo de colocación	Costo por mano de obra (Dólares / m ³)
		Costo equipo (Dólares / m ³)
		Costo encofrado (Dólares / m ³)
MEDIOAMBIENTAL	Capacidad para incorporar adiciones	Residuo añadido (tn/m ³)
	Generación de CO ₂	Cantidad de CO ₂ (tn/m ³)
DESEMPEÑO DE SUS PROPIEDADES	Estado fresco	Consistencia (cms)
		Segregación (puntaje)
	Estado endurecido	Resistencia a la compresión (MPa)
		Resistencia a la tensión (Mpa)
		Adherencia (Mpa)
		Módulo de elasticidad
		Retracción y fluencia
	Durabilidad del material	Resistencia a los cloruros
		Permeabilidad
		Resistencia a la carbonatación
TIEMPO	Colocación del material	Tiempo de colocación en obra (horas/m ³)

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Determinación de pesos para cada requerimiento

Requerimiento	Económico	Medioambiental	Desempeño propiedades	Tiempo	Peso (%)
Económico	1	5	1/5	3	19
Medioambiental	1/5	1	1/7	1/5	7
Desempeño de propiedades	3	7	1	7	59
Tiempo	1/3	5	1/7	1	15

Fuente: elaboración propia

El tercer requerimiento ha sido denominado “desempeño de sus propiedades”, el cual pretende medir el grado de sostenibilidad bajo 3 escenarios: estado fresco, endurecido y la durabilidad del concreto durante su vida útil. El concreto autocompactante, al ser un material con mayor fluidez e integrar ensayos específicos, hace necesario valorar el comportamiento de este tipo de concretos bajo el esquema propuesto en este trabajo.

Finalmente, el último requerimiento -tiempo- supone evaluar ambos concretos bajo un régimen de “desempeño de colocación” medido en horas / metro cúbico.

La asignación de 17 indicadores para esta propuesta, se considera como una cantidad adecuada para el análisis del modelo. El incremento de indicadores no necesariamente contribuye a crear un modelo con mayor grado de rigor o precisión. Por el contrario, aumenta la complejidad del estudio, incrementando las dependencias entre las variables asignadas para las alternativas previamente definidas.

4.1.1 Determinación del peso de las variables

El peso o el grado de importancia de las variables han sido definidos por AHP [10]. Esta herramienta está basada en la comparación entre pares,

mediante una ramificación simplificada, introduciendo la importancia relativa entre cada indicador asignado [19].

La tabla 2 refleja los pesos para los requerimientos. El vector determina el grado de importancia para cada requerimiento usado. Para este caso, el aspecto económico y medioambiental muestra 19 y 7 respectivamente. El aspecto “desempeño de sus propiedades” refleja 59 y el tiempo 15.

4.1.2 Definición de la función de valor

Para cuantificar las alternativas por medio de indicadores, se propone una función de utilidad asignada a cada variable -indicador- previamente definida. Cada indicador se evalúa en un rango de cero a uno, lo cual representa un alto nivel de satisfacción -o no- con el desempeño de cada indicador. Esta “conversión” de dimensión permite calcular el índice de valor tanto en aspectos cualitativos como cuantitativos, que anteriormente se encontraban con unidades diferentes -toneladas, dólares, emisiones, entre otros-.

La “función de valor” se define por cuatro parámetros: X (mín – máx), c , p , k . La variación de dichos parámetros permite que la función utilidad adopte diversas formas - S , cóncava, convexa o lineal-. La ecuación 1 muestra estos parámetros, donde $X_{\text{mín}}$ se refiere al origen del eje de las abscisas del indicador -normalmente cero-; el pa-

rámetro X refleja la respuesta de cada indicador, “ p ” permite definir la forma de la curva arriba mencionada.

$$V_{ind} = F * (1 - e^{-K_i * (\frac{|X - X_{min}|}{C_i})^p}) \quad (1)$$

Las curvas cóncavas se obtienen para valores de $p < 1$; en cambio para valores de $p > 1$, la curva adopta una forma convexa o tipo “ s ”. Para funciones lineales, se obtendrá $p = 1$. Los puntos de inflexión de la curva se determinan por las coordenadas definidas por los parámetros “ c ” y “ k ”. Bajo este contexto, “ c ” representa el punto de inflexión en el eje de abscisas y “ k ” será el punto de inflexión en el otro eje. El factor “ F ” permite mantener la función de utilidad entre 0 y 1, la cual es definida en la ecuación 2.

$$F = (1 - e^{-K_i * (\frac{|X_{máx} - X_{min}|}{C_i})^p})^{-1} \quad (2)$$

Debido a las limitaciones inherentes a la presentación de un artículo, es imposible detallar el comportamiento de las funciones de valor, así como sus respuestas inmediatas. Sin embargo, se han definido dos ilustraciones del desempeño de un par de indicadores de la propuesta realizada. En la tabla 3 se muestran los valores de cada función con el objetivo de otorgar trazabilidad al estudio.

4.1.3 Función de valor para el indicador “Costo de fabricación”

Las características del indicador es definido para crear una función capaz de discriminar entre ambos concretos -alternativas- y evaluar de forma correcta la variable. Es importante resaltar que el costo de fabricación del concreto autocompactante será mayor que el convencional por los propios componentes de ambos. Si bien, el costo es claramente marginal, se deberá estudiar el impacto sostenible de cada atributo.

Tabla 3. Determinación de los parámetros para cada indicador

INDICADOR	X_{min}	$X_{máx}$
Costo de fabricación (Dólares / m ³)	50	200
Costo por mano de obra (Dólares / m ³)	25	100
Costo equipo (Dólares / m ³)	12,5	80
Costo encofrado (Dólares / m ³)	10	150
Residuo añadido (kg/m ³)	0	100
Cantidad de CO ₂ (kg/m ³)	0	50
Consistencia (puntaje)	0	10
Segregación (puntaje)	0	10
Resistencia a la compresión (Mpa)	20	100
Resistencia a la tensión (Mpa)	2	20
Adherencia (Mpa)	0	20
Módulo de elasticidad (Gpa)	25	40
Retracción y fluencia (puntaje)	0	10
Resistencia a los cloruros (puntaje)	0	10
Permeabilidad (puntaje)	0	10
Resistencia a la carbonatación (puntaje)	0	10
Tiempo de colocación en obra (horas/m ³)	0	5

Fuente: elaboración propia

Tanto en la asignación de pesos, como en la definición de funciones de valor, se ha contado con la participación de investigadores especialistas en el área de concretos, profesionales asociados a obra y profesores del área.

La figura 5 muestra que para el parámetro $c = 200$ dólares / m³, considerado para el eje de las abscisas como punto de inflexión; para la coordenada $k = 0,10$; con $p = 2,0$ (pendiente de la curva) y X_{min} y $X_{máx}$ con 50 y 200 dólares / m³ respectivamente.

4.1.4 Función de valor para el indicador “Tiempo de colocación del concreto”

La incorporación de tecnología del concreto, a través de concreto autocompactante, supone una

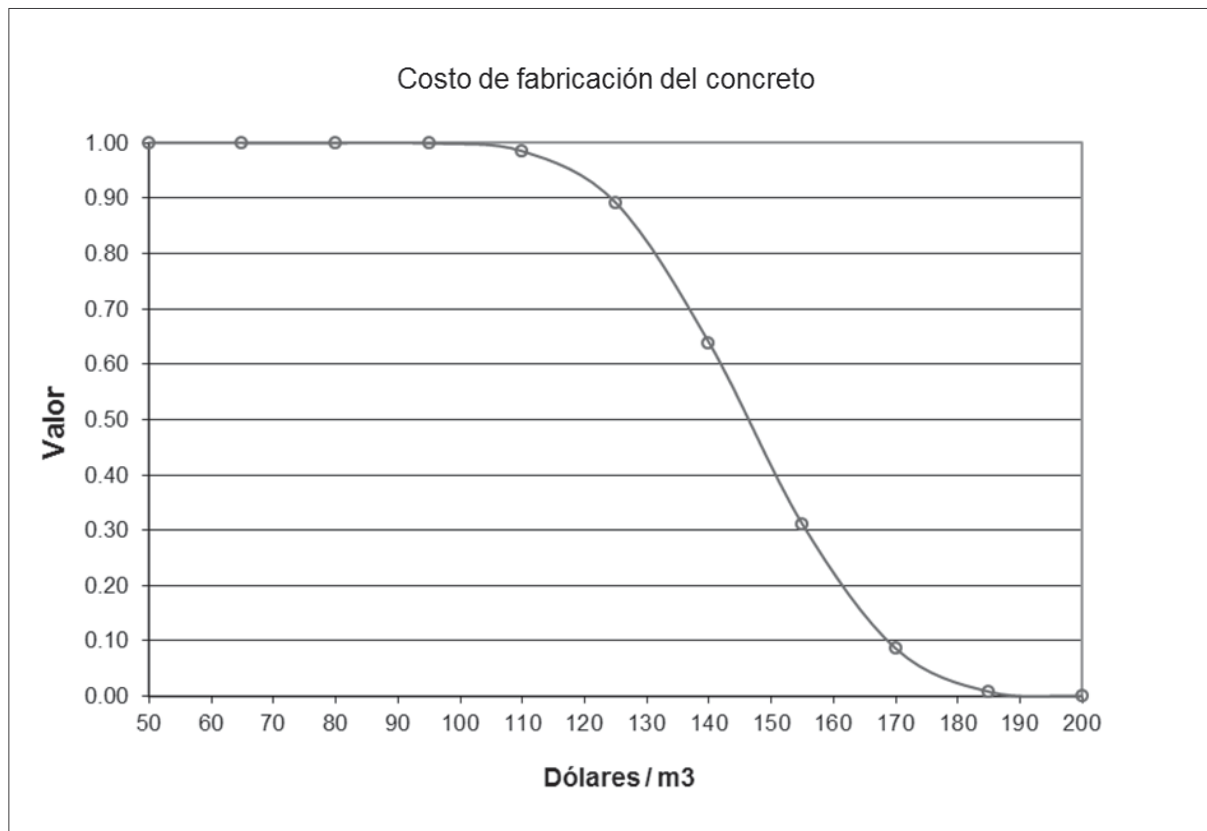


Figura 5. Función de valor para el indicador “Costo de fabricación”

Fuente: elaboración propia

mejora en los tiempos de colocación y recepción de obra. Este indicador se ha configurado de tal forma que permita valorar el grado de sostenibilidad respecto al tiempo que operación para colocar el material dentro de los encofrados. Supone, además, el tiempo de colocación de armado y montaje de la estructura portante -encofrado-, sugiriendo un claro contraste de tiempos entre ambas soluciones.

La función de valor adoptada para este indicador ha sido dada en la figura 6. Representa una forma tipo “S”, la cual considera en el eje de abscisas $X_{\min} = 0$ y $X_{\max} = 10$. Tal como se muestra en la tabla 3. Los parámetros restantes son dados por: $c = 2$; $k = 0,15$ y $p = 2,0$.

La forma de la curva en “s” indica que existe cierta aceptación en el costo del concreto respecto a un costo inicial. Sin embargo, al incrementar cerca de un 30% la satisfacción decrece de forma notoria, tal como se aprecia en la figura 6.

4.2 Cálculo del índice de valor

Para evaluar las alternativas propuestas se sigue el modelo MIVES [7], considerando los pesos y respuestas de cada indicador antes mencionado. Para poder obtener el índice de valor (Ivalor), se multiplican ambos valores asociados a cada indicador. La ecuación 3 refleja el mecanismo de evaluación. Es importante señalar que se ha integrado una variable adicional al modelo original. Se

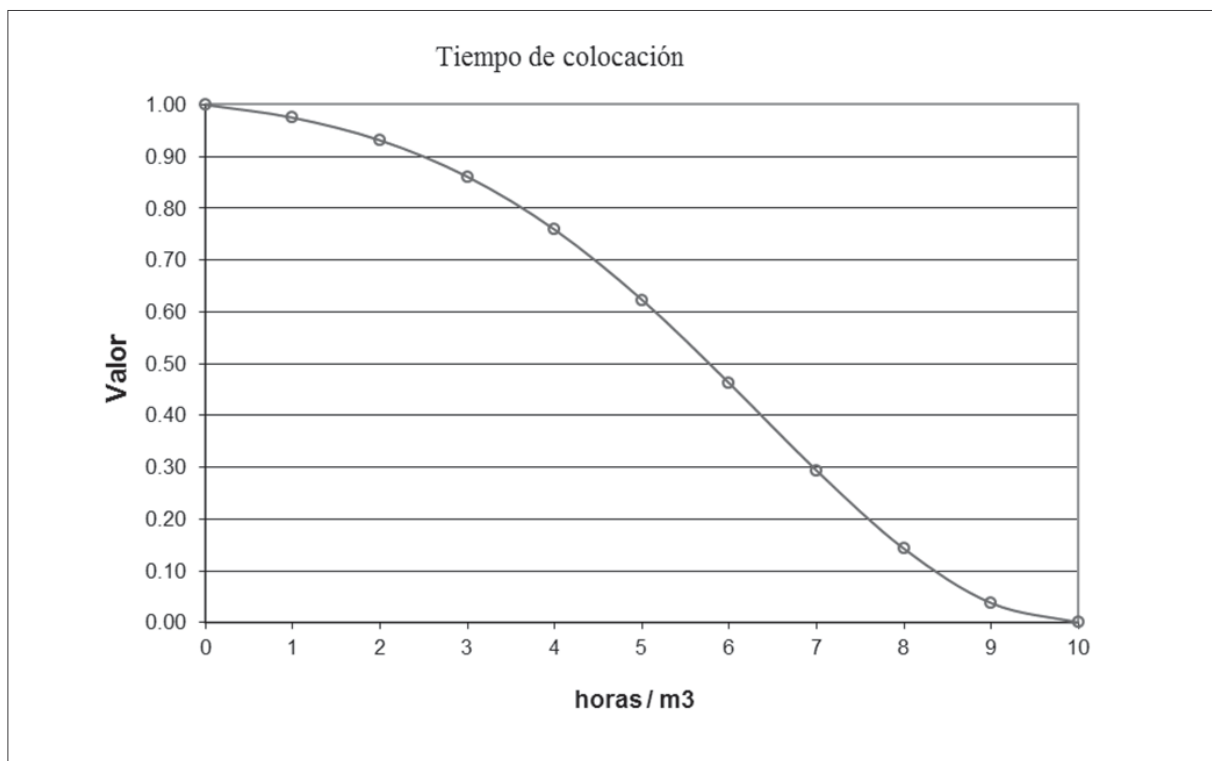


Figura 6. Función de valor para el indicador “Tiempo de colocación”

Fuente: elaboración propia

considera la variable Q , como un factor de riesgo por falta de capacitación del personal que elabora el concreto.

$$I_{VALOR} = \sum_{k=1}^n w(C_k R_n) \times V(C_k R_n) \times Q \quad (3)$$

Se entiende que la variable “ w ” corresponde al peso de cada indicador; “ V ” a la respuesta obtenida en la función de valor y “ Q ” al factor de control de calidad definido por las condiciones de trabajo y la capacitación de la fuerza de trabajo.

4.3 Discusión de los resultados

La tabla 4 refleja los diferentes pesos o grados de importancia (en paréntesis) obtenidos a través de AHP y del consenso entre especialistas de tecnología del concreto. En la tabla se encuentran orga-

nizados según el árbol de requerimientos definido con anterioridad.

Si bien, algunos de los pesos asignados son evidentes, el desempeño y respuesta de cada indicador y la alternativa propuesta -concreto auto-compactante y convencional- serán diferentes. La tabla 4 refleja una clara preocupación de los especialistas por cuidar las propiedades de desempeño del concreto (59%), tanto para el estado en fresco, endurecido como la durabilidad del material durante su ciclo de vida útil.

Por otro lado, la demanda actual del escenario internacional ha mantenido el requerimiento económico como factor esencial en la evaluación del concreto bajo el régimen de sostenibilidad con un 19%. Si bien, el tema medioambiental no ha obtenido resultados favorables respecto a su peso,

Tabla 4. Determinación de los pesos de cada variable

REQUERIMIENTO	CRITERIOS	INDICADORES
ECONÓMICO (19)	Costo de elaboración (35)	Costo de fabricación (100)
	Costo de colocación (65)	Costo por mano de obra (20)
		Costo equipo (40)
		Costo encofrado (40)
MEDIOAMBIENTAL (7)	Capacidad para incorporar adiciones (60)	Residuo añadido (100)
	Generación de CO2 (40)	Cantidad de CO2 (100)
DESEMPEÑO DE SUS PROPIEDADES (59)	Estado fresco (35)	Consistencia (45)
		Segregación (55)
	Estado endurecido (35)	Resistencia a la compresión (30)
		Resistencia a la tensión (20)
		Adherencia (15)
		Módulo de elasticidad (15)
		Retracción y fluencia (20)
	Durabilidad del material (30)	Resistencia a los cloruros (25)
		Permeabilidad (50)
		Resistencia a la carbonatación (25)
TIEMPO (15)	Colocación del material (100)	Tiempo de colocación en obra (100)

Fuente: elaboración propia

los especialistas consideran fundamental mantener esta variable para su evaluación.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo propone una nueva articulación para valorar el grado de sostenibilidad en nuevos materiales y con características especiales. El modelo considera todos los aspectos bajo un régimen sostenible y de forma integrada.

Se ha empleado la herramienta AHP para asignar los pesos de las variables con el objetivo de incorporar rigor en la priorización de los indicadores.

Este estudio deja abierto una segunda iteración que determine las respuestas de los indicadores

para poder determinar el índice de valor de ambos concretos.

El modelo asocia decisiones técnicas y políticas que permite obtener resultados de una forma práctica y con rigor científico.

Se ha incorporado una nueva variable al modelo MIVES que permite medir el riesgo debido a la mala ejecución de obra y condiciones de trabajo adversas -clima, social, entre otras-.

Este estudio permitió generar una cartera de indicadores que permita evaluar de forma simplificada la sostenibilidad de un material dentro del sector de la construcción.

REFERENCIAS

- [1] F. Rodríguez y G. Fernández, “Ingeniería Sostenible: Nuevos Objetivos en los Proyectos de Construcción”, *Revista Ingeniería de la Construcción*, Vol. 25, No. 2, pp. 147-160, agosto 2010.
- [2] J. Andrade y L. Bragança, “Analysis of the impacts of economic and social indicators to sustainability assessment”, in the *International Conference Sustainability of Constructions - Towards a better built environment. COST Action C25*, pp 163-168.
- [3] A. Vitervo, O. Díaz, R. Bancroft y L. Ruiz, “Las tecnologías del concreto en su ciclo de vida”, *Revista concreto y cemento*, Vol. 1, No. 2, enero-junio 2010.
- [4] O. Akindeji-Oladeji, J. Awomeso, A. Taiwo and S. Abu, “Desarrollo sostenible de las carreteras africanas”, *Revista Materiales de Construcción*, Vol. 62, No. 308, pp. 607-614, octubre-diciembre 2012.
- [5] M. Schnapper y S. Rollins, *Value-based metrics for improving results*. Fort Lauderdale: J. Ross Publishing, 2006.
- [6] R. Losada, E. Rojí y J. Cuadrado, *La medida de la sostenibilidad en edificación industrial*. Bilbao: R. Losada, E. Rojí, J. Cuadrado, eds., 2006.
- [7] J. San José and I. Garrucho, “A system approach to the environmental analysis of industrial buildings”, *Building&Environment*, Vol. 45, pp. 673-683, 2010.
- [8] J. San José y A. Josa, “Planteamiento MIVES para la evaluación. El caso de la EHE.”, *Cemento y hormigón*, Vol. 913, pp. 26-34, 2008.
- [9] T. Saaty, *AHP: The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, 1980.
- [10] N. Villegas, *Análisis de valor para la toma de decisión aplicado a carreteras: secciones transversales* [PhD Tesis], 2009.
- [11] A. Aguado, R. Manga y G. Ormazábal, “La medida de la sostenibilidad en edificación industrial”, en *Los Aspectos Conceptuales del Proyecto MIVES*. Ed. UPV-EHU, 2007.
- [12] A. Santos, “Caracterización de las propiedades del hormigón autocompactante asociadas al esqueleto granular”, [PhD Tesis], 2010..
- [13] P. Gomes, “Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete”, [PhD Thesis], Department of Engineering Construction, 2002.
- [14] BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO, “The European Guidelines for Self-compacting Concrete”, European Project Group, 2005.
- [15] H. Alwaer and D. Clements-Croome, “Key performance indicators (KPIs) and priority setting in using the multi-attribute approach for assessing sustainable intelligent buildings”, *Building and Environment*, Vol.45, pp.799-807, 2010.
- [16] D. Crawley and I. Aho, “Building environmental assessment methods: applications and development trends”, *Building*

- Research & Information, Vol. 27, pp. 300-308, 1999.
- [17] Forsberg, A. and Von Malmberg, F. "Tools for environmental assessment of the built environment", Building and Environment, Vol. 39, pp. 223-228, 2004.
- [18] S. Sasmal, K. Ramanjaneyulu and N. Lakshmanan, "Priority ranking towards condition assessment of existing reinforced concrete bridges", Structure and Infrastructure Engineering. Vol. 3, No. 1, pp. 75-89, 2007.