

LA SOSTENIBILIDAD COMO VARIABLE EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL

Peralta, M. Haydée *; Ercoli, Norma L. *; Falcón, Gonzalo**

* Ingeniero Civil; Profesor Área de Estructuras- Depto Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería
mperalta@fio.unicen.edu.ar;nercoli@fio.unicen.edu.ar–Olavarría-UNICEN

** Becario BICT 2015- Alumno Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería –Olavarría-UNICEN

RESUMEN

En Argentina los criterios de diseño de estructuras, contemplan muy incipientemente el criterio de sostenibilidad que ha evolucionado en las últimas décadas contemplando aspectos económicos, sociales y medioambientales. El sector de la construcción, respecto de otros sectores industriales, presenta complejidades por la amplia y variada gama de aspectos relacionados con el diseño, los materiales, tecnología disponible y mantenimiento en servicio.

En las estructuras de hormigón, adquieren relevancia las evaluaciones relacionadas con la sostenibilidad en el diseño, construcción, uso y reutilización, es decir el Ciclo de Vida útil. Desarrollos internacionales permiten definir un índice de la valoración de sostenibilidad para las estructuras de obras civiles. En particular, en España se utiliza el método **MIVES**, Modelo Integrado de Valor para la Evaluación Sostenible.

En este trabajo se aplica esta metodología con el objetivo de generar criterios que permitan cuantificar la sostenibilidad del diseño estructural de entresijos de hormigón armado, a partir de indicadores de Argentina. Particularmente, se evalúan entresijos de hormigón armado con tipologías de uso habitual para edificios. La cuantificación de indicadores de sostenibilidad permitió establecer la significación de las variables que intervienen jerarquizando las etapas de diseño, construcción, materiales, tecnología y la incidencia del lugar de emplazamiento de la obra por su vínculo con la durabilidad y la disponibilidad de materiales.

ABSTRACT

*Structural design criteria in Argentina, responds to the structural safety, durability and specially the solution's sustainability. This concept has evolved in the last decades considering economic, social and environmental aspects. The industrial sector is more developed compared to the construction sector, due to the variety in design criteria, materials and technology available as well as maintenance issues under service conditions. The evaluations related to sustainability during the design, construction and service life cycle become important on a reinforced concrete structure. International researches and developments allow to define a sustainability ratio for civil structures, in particular, the Spanish **MIVES** method (for its Spanish initials). This methodology is applied in the present paper with the aim of generating criteria that will make possible to quantify the sustainability of structural design of reinforced concrete slabs. Particularly, these concrete slabs are evaluated with typologies of common use for buildings. The quantification of the sustainability ratios enabled to establish the meanings for every variable used in the method, rank the design steps, materials and technology available, and also identify the importance of the construction emplacement.*

INTRODUCCIÓN

El concepto de desarrollo sostenible ha evolucionado en las últimas décadas hasta tener hoy una importancia capital en las decisiones que se toman dentro del mundo desarrollado y paulatinamente es incorporado en los países con menor desarrollo. La inclusión de criterios sobre sostenibilidad está más desarrollada en los sectores industriales que en el sector de la construcción. A pesar de esto, en varios países se han dado pasos importantes para cuantificar la sostenibilidad en el sector de la construcción, como por ejemplo la inclusión de un Anexo en la normativa para estructuras EHE de España ⁽¹⁾ y ⁽²⁾.

La definición habitual de sostenibilidad indica "cubrir las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para cubrir sus necesidades" [ONU, 1987]. Esta definición plantea importantes retos al sector de la construcción, y de las estructuras en particular. Los aspectos relacionados con las materias primas, el consumo y ahorro energético, la contaminación ambiental, la reducción de residuos, el reciclado de materiales, etc., se perciben y deben ser tratados desde esta nueva perspectiva.

La sostenibilidad, con sus tres pilares: económicos, sociales y medioambientales, responde muy bien al nuevo paradigma, ya que tiene en cuenta a la economía como motor de cambios, a las personas que, por un lado, lo demandan y, por otro lado, lo hacen posible y, por último, al cuidado del entorno. ⁽³⁾.

La importancia del sector de la construcción en los países está marcada principalmente, por su influencia en la sociedad, ya que afecta directamente a la calidad de vida de los ciudadanos a través de las actuaciones en construcciones, e infraestructuras y obras civiles en general.

En Argentina los criterios de diseño de estructuras, atienden la seguridad estructural, la durabilidad, y muy incipientemente la sostenibilidad de las soluciones ⁽⁴⁾. En las estructuras de hormigón, adquieren relevancia las evaluaciones relacionadas con la sostenibilidad en el diseño, construcción, uso, y deconstrucción que contempla el Ciclo de Vida útil definido en el proyecto. Para contemplar su análisis desde la sostenibilidad, se requiere una ponderación de cada uno de los pilares para poder configurar la decisión final. Esto es, el planteo desde el punto de vista de la sostenibilidad es, necesariamente, más complejo que el planteo usual estructural ⁽³⁾.

En el caso del hormigón, cabe aclarar que es el material de construcción más usado a nivel mundial con 25 billones de toneladas al año, elemento más utilizado después del agua, lo cual da muestras del alto impacto de un uso racional del mismo. Particularmente, en la región de Olavarría se produce el 50 % del cemento del país, y más del 50 % de los agregados, los dos componentes que intervienen con mayor volumen en el m³ de hormigón.

El análisis de la sostenibilidad en el sector de la construcción presenta diferencias con respecto a otros sectores, que se pueden resumir como ⁽³⁾:

- Salvo excepciones, la construcción crea productos únicos e irrepetibles y no productos seriados. Ellos suele ser determinante para la empresa –porque obliga a “inventar” cada vez la organización y desarrollo de la actividad- y para el trabajador – porque su permanencia está ligada a la duración de la obra-.
- Es una industria, mayoritariamente, de carácter nómada, sin que se pueda concentrar usualmente en una fábrica. Los clientes de la construcción no adquieren un producto acabado sino una promesa de ejecución cuya fiabilidad depende de la solvencia y garantía del constructor.
- Es una industria muy tradicional, con gran inercia a los cambios, pero por otro lado, la incorporación de nuevas empresas es fácil, ya que no es necesario disponer de mano de obra fija ni de una gran dotación de capital fijo inicial.
- No es aplicable, usualmente, la producción en cadena sino la producción concentrada (operarios móviles en torno a un producto fijo), lo que dificulta la organización y control de los trabajos.
- Utiliza mano de obra intensiva poco calificada, el empleo de muchas personas tiene carácter eventual y sus posibilidades de promoción son escasas. Todo ello repercute en una baja motivación en el trabajo y en bajas de calidad.
- Otras industrias trabajan a cubierto, mientras la construcción lo hace, en un gran número de casos, a la intemperie, con dificultades de buen almacenamiento, sometida a las inclemencias del tiempo.
- En construcción, el usuario influye muy poco en la calidad del producto, ya que no coincide generalmente con el propietario y sus intereses pueden ser muy diferentes. Este concepto es algo que está evolucionando, especialmente con los sistemas de calidad total que se centran en la satisfacción del cliente y el usuario final del producto o servicio.
- Los poderes públicos tienen enorme influencia en el sector por su capacidad reguladora, particularmente importante en materia de contratación, sobre todo por aquellas empresas cuya actividad está más concentrada en la obra civil.
- Se emplean especificaciones complejas, a menudo contradictorias y no pocas veces confusas. Las calidades resultan mal definidas de origen. Asimismo, las responsabilidades aparecen dispersas y poco definidas.
- El grado de precisión con el que se trabaja es, en general, mucho menor que en otras industrias.

El proceso constructivo constituye un ciclo y el tiempo de vida útil de la construcción suele trascender a la vida profesional o real de los agentes intervinientes en la misma.

La etapa de Planificación se sitúa, tanto en el ámbito de construcción, como el de la deconstrucción. Con ello se quiere expresar que a la hora de planificar hay que tener en cuenta el ciclo completo, para cumplir el compromiso de equilibrio que la sostenibilidad representa. Con respecto al tiempo de vida útil, variable para cada tipo de estructura, de 50 años para las construcciones en general, hay que tener

presente que los tiempos de construcción, suelen ser significativamente menores (inferiores al 10%) en la gran mayoría de los casos, por lo que a la hora de pensar en sostenibilidad, no solo hay que enfatizar en la etapa de materialización, sino de forma muy importante en la etapa de uso.

Teniendo en cuenta que *los procesos del sector de la construcción*, pueden ser cuantificados matemáticamente, ya sea de forma determinística o con herramientas de matemáticas difusas y probabilísticas, en aras a obtener productos que cumplan todas las prescripciones y sean considerados de valor. Recientes desarrollos internacionales permiten definir un índice de la valoración de sostenibilidad para las estructuras de obras civiles.

Criterios y contexto normativos - Metodología utilizada

El análisis de los desarrollos a nivel mundial, permite considerar a España como avanzada en el desarrollo de herramientas para valorar la contribución de la estructura a la sostenibilidad. Como resultado de ello pueden identificarse tres niveles para el planteamiento de estrategias de sostenibilidad de las estructuras:

1. El nivel I, basado en el cumplimiento de medidas de "buena práctica ambiental". No conlleva, por lo tanto, ningún tipo de evaluación cuantitativa.
2. El nivel II, basado en la aplicación de los índices **ISMA e ICES**, definidos por el Anexo 13 de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 ^{(1),(2)}. Se trata de un método cuantitativo simplificado desarrollado a partir del Modelo Integrado de Valor para Evaluación Sostenible, **MIVES** ^{(5) (6),(7)}.
3. El nivel III, basado en el análisis del ciclo de vida, conforme a la ISO 14.040 y prEN 15.804.

Desarrollo de la Metodología **MIVES** correspondiente al Ítem 2 :

Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad, ICES, NIVEL II, parte de lo que se denomina **Índice de Sensibilidad Medioambiental, ISMA**, corregido a través de una serie de criterios relacionados con lo económico y lo social. El índice **ISMA** considera la identificación de una serie de requerimientos ambientales que se ha entendido que deben tenerse en cuenta en la estructura. Un problema en la toma de decisiones con criterios múltiples se plantea cuando un decisor tiene que elegir entre un conjunto de alternativas, continuo o discreto, teniendo un problema genérico definido, a través de un índice de valor, que resulta de una suma ponderada de las valoraciones de los diferentes criterios considerados, admitiendo que existe certidumbre.

*Las fases de la metodología **MIVES** comprenden:*

1. Delimitación de la decisión: Los aspectos fundamentales son:
 - Quién toma la decisión: pueden intervenir distintos agentes con distintos puntos de vista, y obtener la mejor alternativa no es inmediato y depende de quien tome la decisión, respondiendo a sus intereses.
 - Cuáles son los límites del sistema: Para identificar la toma de decisión, ésta se estructura en tres ejes, donde las líneas claras demarcan los límites del sistema. En uno de los ejes, la decisión se descompone en todo su ciclo de vida. En otro eje, la toma de decisión se divide en todos sus componentes, es

decir en las partes que componen las diferentes alternativas. Y en el tercer eje figuran todos aquellos requerimientos o aspectos en los que se quiere valorar las diferentes alternativas

- Qué condiciones de contorno existen: Las circunstancias que rodean a la toma de decisión pueden ser diferentes dependiendo de factores: temporales, geográficos, climatológicos, tipo de sociedad, etc. Para que la valoración de las alternativas que solucionan un problema sean comparable, las condiciones de contorno deben ser iguales.
2. **Árbol de toma de decisión:** Es el ordenamiento en forma ramificada de todos aquellos aspectos que serán estudiado y que se han estructurado en la primera fase. Existen varios niveles en la ramificación que pueden subdividirse en subniveles. En los primeros niveles, se encuentran los aspectos más cualitativos y generales denominados requerimientos. Para realizar una valoración del grado de sostenibilidad de las diferentes alternativas, los requerimientos suelen coincidir con los tres pilares básicos de la sostenibilidad: económico, social y medioambiental. En los niveles intermedios de la ramificación se encuentran los criterios y subcriterios, y en los últimos niveles se encuentran los aspectos más concretos y que van a ser evaluados directamente: **los indicadores**.

Los requerimientos y los criterios generalmente son escogidos por políticos o gestores, debido a que son ellos quienes deben definir los aspectos que consideran más importantes o las líneas generales de mejora que deben seguirse; también deben decidir el peso o la importancia relativa de éstos. *Para los indicadores, deben ser los técnicos quienes definan ya que estos aspectos tienen un carácter más específico y generalmente son las características técnicas las que permiten determinar qué indicadores son los apropiados para los diferentes criterios.*

Cada requerimiento ha sido ponderado de acuerdo a un consenso definido entre todos los agentes involucrados. Por ello, el **ICES** está definido a partir del **ISMA** según la Ecuación 1:

$$ISMA = \sum_{i=1}^{j=11} \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot V_i \quad (1)$$

Donde los parámetros α_i , β_i , γ_i representan factores de ponderación de acuerdo a lo indicado en la Tabla 1:

Requerimientos Medioambientales	Coeficientes de ponderacion		
	α	β	γ
Características medioambientales del hormigon	0,60	0,22	0,50
Características medioambientales de las armaduras			0,50
Optimizacion del armado de los elementos			0,17
Optimizacion ambiental del acero		0,33	0,33
Nivel del control de ejecucion			0,50
Empleo de aridos reciclados			0,33
Optimizacion del cemento	0,45	0,50	
Optimizacion del hormigon		0,17	
Medidas específicas para el control de impactos		0,25	1,00
Medidas específicas para gestionar los residuos	0,75		0,67
Medidas específicas para gestionar el agua			0,33

Tabla 1.- Factores de Ponderación

Por su parte, los Vi son Funciones de Valor, con el objetivo de poder comparar las valoraciones de los indicadores con unidades de medidas diferentes. De esta forma, se podrá realizar una suma ponderada de las diferentes valoraciones de cada uno de los indicadores.

Estas Funciones de Valor dependen de cinco parámetros, de los cuales cuatro de ellos fueron definidos por la Administración (año 2008), para fomentar preferentemente algunos de los criterios que se consideraron entonces prioritarios. Para la fase de valoración de los indicadores, se plantean diferentes funciones de valor para cada uno de ellos. Estas funciones de valor, que varían entre 0 y 1 en el eje de ordenadas, representan estado de valoración nula o valoración máxima, respectivamente, para cada uno de los indicadores. En el eje de las abscisas se encuentra la variable del indicador. La función de valor usada se define mediante cinco parámetros que, al variarlos, permite obtener todo tipo de formas: forma de S, cóncavas, convexas o lineales, Figura 1. La utilización de una u otra forma para las funciones de valor individuales depende de las características del indicador a evaluar y del objetivo que se pretenda obtener con ello:

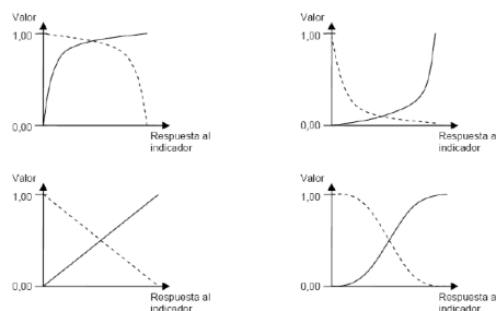


Figura 1.- Formas de las Funciones de Valor

Las funciones convexas experimentan un gran aumento de valor para respuestas cercanas a la que genera el mínimo valor, disminuyendo el incremento de valor a medida que la respuesta se acerca a la que genera el máximo. Este tipo de función, de baja exigencia, se utilizará cuando se quiere incentivar el cumplimiento de unos requisitos mínimos. Este puede ser el caso, por ejemplo, de normativas suficientemente exigentes, donde baste con que se cumpla dicha normativa; o de situaciones donde se quiera premiar la utilización de nuevas tecnologías y se valore muy positivamente esa implantación, aunque sea en un pequeño porcentaje, con objeto de abrir nuevos caminos. En este campo se considera: Caracterización del hormigón y de las armaduras, Optimización del armado, Gestión de los residuos, Gestión del agua

El caso contrario es el de las funciones cóncavas, de alta exigencia, con las que se busca llevar al proyectista (o a su cliente) a puntos cercanos al de máxima satisfacción. Este puede ser el caso de aspectos ya muy trabajados y cuyo cumplimiento no supone problemas importantes para el sector de la construcción. En general, por ejemplo, los aspectos de economía en costes pueden tratarse con este tipo de función, por ejemplo Sistema del control de ejecución, Reciclado de áridos

En la función con forma de “S” el mayor incremento de valor se produce en la parte central del rango de respuestas. Se emplea en aquellos indicadores donde se considera que lo apropiado debería ser que se alcanzase una respuesta media.

La última opción es la función recta, donde el incremento de valor es constante a lo largo del rango de posibles respuestas. Esta función se usa cuando no se tienen razones especiales que apoyen el uso de las anteriores. Por ejemplo: Optimización del acero, Optimización del cemento, Optimización del hormigón, Control de impactos

El quinto parámetro depende de las condiciones reales del proyecto u obra. De acuerdo con estos criterios, se define la Función de Valor en la Ecuación 2:

$$V_i = K_i \left[1 - e^{-m_i \cdot \left[\frac{|X_{i,x} - X_{i \min}|}{n_i} \right]^{A_i}} \right] \quad (2)$$

Donde X_{\min} es el valor en abscisas, cuya valoración es igual a cero y X_{\max} la abscisa que genera un valor igual a 1 (caso de funciones de valor crecientes estos corresponden con el mínimo y máximo valor de abscisa posible, caso de decrecientes se intercambian respectivamente).

$X_{i,x}$ es la abscisa del indicador evaluado (variable para cada alternativa)

A_i es un factor de forma que define si la curva es cóncava, convexa, recta o con forma de S. Obteniéndose curvas cóncavas para valores de $A_i > 1$, convexas o S si $A_i < 1$ y teniendo rectas para $A_i = 1$. Además determina de forma aproximada la pendiente de la curva en el punto de inflexión de coordenadas (A_i, m_i) .

n_i se aproxima a la abscisa del punto de inflexión.

m_i se aproxima a la ordenada del punto de inflexión.

K_i es el valor que permite que la función se mantenga en el rango de valor de 0 a 1. Esta viene definido por la ecuación 3:

$$K_i = \frac{1}{\left[1 - e^{-m_i \cdot \left[\frac{|X_{i \max} - X_{i \min}|}{n_i} \right]^{A_i}} \right]} \quad (3)$$

Según la definición de la función, existen valores recomendados para las constantes mencionadas, al momento de definir las propias del índice, se las vio relacionadas con los límites correspondientes X_{\max} y X_{\min} .

Dependiendo de la elección del punto de máxima y mínima satisfacción, las valoraciones de cada uno de los indicadores pueden variar de forma considerable llegándose a diluir ciertos resultados. Para determinar los puntos de mínima y máxima satisfacción el usuario puede ayudarse de 3 opciones:

- Utilizar la normativa vigente: En muchos indicadores utilizados existe una normativa que como mínimo regula los valores mínimos exigidos.

- Según la estrategia del decisor o ciertos condicionantes de la toma de decisión.
- Comparación entre alternativas. Si el rango entre X_{\min} y X_{\max} es mucho mayor al rango de resultado, todas las alternativas quedan valoradas de forma parecida. Por el contrario, si el rango es pequeño, la valoración del indicador será 0 o 1 en función de las alternativas estudiadas. Para evitarlo, se recomienda realizar la función acumulada de las cuantificaciones de las alternativas y ajustar los valores X_{\min} y X_{\max} de la funciones de valor. Esta fue la alternativa más usada en el presente trabajo, se dieron con una gran cantidad de valores a partir del cálculo de varios entrepisos y se tomaron los límites (X_{\max} y X_{\min}) según el de mayor y menor satisfacción, luego las funciones de valor se armaron según valores recomendados.

Una vez definido el **ISMA**, Ecuación 1, se introduce una corrección para contemplar otros criterios, Ecuación 4. Por una parte, se valora un aumento de la vida útil por encima de los valores establecidos en la reglamentación mediante el coeficiente **b**. Este planteamiento se basa inicialmente en criterios de amortización económica de las inversiones, si bien ignora que, como luego se indicara, un incremento de la vida útil puede requerir de la adopción de medidas que pueden no ser positivas de cara al consumo de recursos (limitando la misma a un valor máximo). Por otra parte, se introducen una serie de correcciones basadas en criterios sociales, según Tabla 2.

$$ICES = a + b \cdot ISMA \quad (4)$$

Subcriterio	En proyecto	En ejecución
El constructor aplica metodos innovadores que sean resultado de proyectos de I+D+i realizados en los ultimos 3 años	a1=0	a1=0,02
Al menos, el 30% del personal que trabaja en la ejecucion de la estructura ha tenido cursos de formacion especifica en aspectos tecnicos, de calidad o medioambientales	a2=0	a2=0,02
Se adoptan medidas voluntarias de seguridad y salud adicionales a las establecidas reglamentarias para la ejecucion de la estructura	a3=0	a3=0,04
Se elabora una pagina Web publicay especifica para la obra al objeto de informar al ciudadano, incluyendo sus características y plazos de ejecucion, asi como sus implicaciones economicas y sociales	a4=0,01	a4=0,02
Se trata de una estructura incluida en una obra declarada como de interes general por la Administracion Publica competente	a5=0,04	a5=0,04

Tabla 2.- Correcciones “a” basadas en criterios Sociales

Criterios para la adopción de Indicadores en Argentina

Para la **evaluación social y económica** se consideraron precios de mercados locales y en cuanto al impacto social valores reconocidos a nivel mundial.

Para la **evaluación ambiental** se desglosaron las materias primas que conforman cada entrepiso y se analizó el impacto y consumo de forma individual. Se analizó:

1. Impacto de la industria del Cemento:

Éste tiene uno de los mayores impactos, debido a la gran cantidad de emisiones (8, 9). Los consumos y emisiones relacionados a la producción de una tonelada de cemento son los mostrados en Tabla 3 según datos de cementera local.

Consumo	Cantidad	Emisión	Cantidad
Agua	1693 kg	CO2 eq	0,729 ton.
Energía Eléctrica	3,13 GJ	NOx	2,66 kg
		SOx	0,003 kg
Consumo de Mat. Primas	1730 kg	Part. Finas	0,232 kg
		CDK	0,15 ton.
		Comp. Volátiles Orgánicos	0,263 kg

Tabla 3.- Consumos y Emisiones en la Producción del Cemento

2. Impacto de la industria del Acero:

Se consideran consumos de agua, energía eléctrica y de materias primas y las emisiones producidas al medio ambiente según Tabla 4 que corresponden a una tonelada bruta de acero (10)

Consumo	Cantidad	Emisión	Cantidad
Agua	23950 kg	CO2 eq	1,098 ton.
Energía Eléctrica	18,35GJ	NOx	0,5816 kg
		SOx	0,5816 kg
Consumo de Mat. Primas	1163kg	Part. Finas	0,067 kg
		CO	0,436 kg

Tabla 4- Consumos y Emisiones en la Producción de Acero

3. Impacto de la industria de los Agregados:

Se debe diferenciar el agregado grueso del fino. El agregado fino, tanto silíceo como granítico no tiene un fuerte impacto ya que uno proviene de una simple recolección y otro de un residuo de trituración (impacto atribuido al agregado grueso). Para el agregado fino, se considerará solo el lavado con agua, por lo tanto no tendrá emisiones pero sí el consumo de 3500kg de agua por cada tonelada de agregado fino producido (11)

El agregado grueso tendrá tanto consumo de materias primas como emisiones, según se indica en Tabla 5 para una tonelada bruta de agregado grueso

Consumo	Cantidad	Emisión	Cantidad
Agua	2500 kg	CO2 eq	0,000012 ton.
Energía Eléctrica	0,601 GJ	NOx	0,00012 kg
Consumo de Mat. Primas	1110 kg	NH3	0,00014 kg
		Part. Finas	0,0332 kg
		CO	0,0012 kg

Tabla 5.- Consumo y Emisiones en la Producción del Agregado Grueso

4. Impacto de la Planta Hormigonera:

El consumo y las emisiones se muestran en Tabla 6 y corresponden a una tonelada bruta de hormigón (datos obtenidos de una hormigonera local). Al tener consumo de energía eléctrica, también produce emisiones indirectamente definidas por la matriz energética del país

Consumo	Cantidad	Emisión	Cantidad
Agua	55,53 kg	CO2 eq	0,00004 ton.
Energía Eléctrica	0,0011 GJ	Part. Finas	0,1 kg

Tabla 6.- Consumos y Emisiones en la Planta Hormigonera

5. Impacto del transporte:

El transporte de materiales tiene un fuerte impacto en el ámbito de las emisiones. Para los mismos se consideraron las distancias de transportes, según Tabla 7, de todos los materiales y se obtuvieron las emisiones correspondientes. Para ello se consideró la capacidad de los camiones y las cantidades de km recorridos por cada material y se obtuvieron las emisiones totales. Se consideró una emisión de 124 gCO₂ eq/km.t (por tonelada de material transportado) ⁽¹²⁾

Industria	Distancia
Fábrica de Cemento	10 km
Fábrica de Acero	354 km
Cantera de Piedra Partida	33 km
Cantera de Arena Granítica	33 km
Cantera de Arena Silíceo	564 km
Planta Hormigonera	6 km

Tabla 7.- Distancias de Transporte

6. Impacto de los Aditivos:

Para este caso, se destacan únicamente las emisiones CO₂, las cuales son de 0,00021 tCO₂eq por tonelada de aditivo ⁽¹³⁾.

Aplicación Práctica- ESTUDIO DE CASOS

En este trabajo se expone la experiencia desarrollada con la metodología MIVES y con indicadores de Argentina, aplicada en la evaluación de entresijos de hormigón armado con tipologías de uso habitual para edificios. Cabe aclarar que lo expuesto forma parte de un trabajo de investigación más amplio que incluye el Proyecto Final de Carrera del becario coautor del trabajo.

El objetivo principal es llegar a un índice de valoración sostenible para un entresijo de hormigón armado en Olavarría, y se consideraron distintas tipologías utilizadas en la construcción de entresijos de edificios, con mano de obra local y materiales provenientes de la zona. La cuantificación de indicadores de sostenibilidad permitió establecer la significación de las diferentes variables que intervienen, jerarquizar las etapas de diseño, construcción, materiales y tecnología, y la incidencia significativa el lugar de emplazamiento de la obra.

Descripción de las tipologías estructurales y datos del proyecto

Se consideró un entresijo de 18m x 18m de lado, perteneciente a un edificio de propiedad horizontal, ubicado en el centro de la ciudad de Olavarría. La distribución de losas, vigas y columnas para el proyecto arquitectónico se muestran en el croquis en planta de Figura 2.

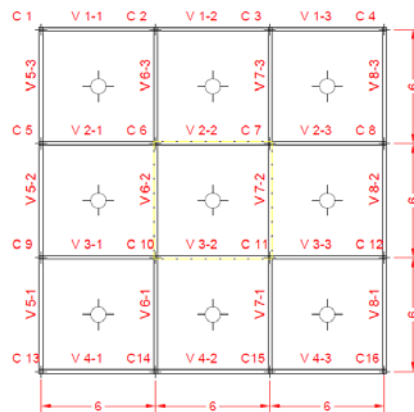


Figura 2.- Croquis Planta de Entresijo

Todas las evaluaciones y cuantificaciones para establecer el Índice de Sostenibilidad, se realizaron considerando el volumen de materiales y construcción de la losa central de 6 m x 6 m y su perímetro con o sin vigas. (Losa central y vigas)

Se evaluaron además distintas cuantías de armado, opciones constructivas y calidades del material hormigón, según detalle siguiente:

- *Opción 1: Hormigón elaborado provisto por una planta hormigonera; el acero llega a obra en barras de 12m y se usa encofrado tradicional.*
- *Opción 2: Hormigón elaborado provisto por planta hormigonera; el acero provisto en barras de 12m y en caso que sea posible uso de mallas prefabricadas y se usa encofrado tradicional.*
- *Opción 3: Hormigón elaborado provisto por una planta hormigonera; el acero llega a obra en barras de 12m y se usa encofrado industrializado.*

- **Opción 4: Hormigón elaborado provisto por una planta hormigonera; el acero provisto en barras de 12m y caso que sea posible uso de mallas prefabricadas y se usa encofrado industrializado.**

Para la etapa constructiva de las diferentes opciones, se consideró el alquiler de una grúa de 4tn con un brazo de 10m, utilizada para mover los encofrados y colocar el hormigón. Para el cálculo estructural se tuvo en cuenta una carga de un contrapiso y piso convencional y una sobrecarga destino oficinas de $(5kN/m^2)^{(14)}$.

Se consideraron calidades de hormigón H-25, H-30, H-35 y HAC-30 (autocompactante), con dosificaciones que se muestran en la Tabla 8:

Dosificación Considerada:	Cemento (kg/m3)	Piedra Part. (kg/m3)	Arena Granítica (kg/m3)	Arena Silicea (kg/m3)	Agua (kg/m3)	Escoria (kg/m3)	Aditivo (Kg/m3)
H 25	361	1024	0	783	181	0	2
H 30	407	1023	0	728	175	0	3
HAC 30	272	851	574	246	210	131	1,33
H 35	486	1023	0	662	175	0	3

Tabla 8.- Dosificaciones Consideradas.

Además de lo indicado se consideraron distintos recubrimientos, con el objetivo de evaluar distintas posibilidades de durabilidad. Para el caso de los materiales se consideraron los utilizados en la zona de emplazamiento de la construcción, considerando las distancias de transporte de los materiales, ya que éstas son de gran impacto ambiental, indicadas en la Tabla 7.

Resultados de los diseños de las tipologías estudiadas

Las tipologías comparadas para la generación del índice que se presentan en este trabajo son: **losa cruzada con vigas perimetrales** (dimensiones 0.2 m x 0.6 m); y **entrepiso sin viga con ábaco**. Se procedió al cálculo de las mismas, tanto de las secciones de hormigón como de las armaduras necesarias. El cálculo se llevó a cabo aplicando los criterios del Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón Armado CIRSOC 201/05⁽⁴⁾, cuyos resultados se presentan en Tabla 9.

✓ **Losa Cruzada con vigas perimetrales**

Hormigon H	Recub. (mm)	LOSA CRUZADA				VIGAS PERIMETRALES		
		Altura Losa (cm)	ARMADURA		ARMADURA		ESTRIBOS	
			TRAMOS	APOYOS	TRAMO	APOYO		
25	30	15	f18 c/12cm	f10 c/9cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 8 c/6cm	
25	30	16	f18 c/13cm	f10 c/10cm	4 fi 20mm	4 fi 25mm	fi 8 c/6cm	
25	30	18	f18 c/15cm	f10 c/11cm	4 fi 20mm	4 fi 25mm	fi 8 c/6cm	
25	35	15	f18 c/12cm	f10 c/9cm	4 fi 20mm	4 fi 25mm	fi 8 c/6cm	
25	35	16	f18 c/13cm	f10 c/10cm	4 fi 20mm	4 fi 25mm	fi 8 c/6cm	
25	35	18	f18 c/15cm	f10 c/11cm	4 fi 20mm	4 fi 25mm	fi 8 c/6cm	
25	40	15	f18 c/11cm	f10 c/8cm	4 fi 16mm	4 fi 25mm	fi 8 c/6cm	
25	40	16	f18 c/12cm	f10 c/9cm	4 fi 20mm	4 fi 25mm	fi 8 c/6cm	
25	40	18	f18 c/14cm	f10 c/11cm	4 fi 20mm	4 fi 25mm	fi 8 c/6cm	
30	30	15	f18 c/12cm	f10 c/9cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 10 c/10cm	
30	30	16	f18 c/14cm	f10 c/10cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 10 c/10cm	
30	30	18	f18 c/15cm	f10 c/12cm	4 fi 20mm	4 fi 25mm	fi 8 c/6cm	
30	35	15	f18 c/12cm	f10 c/9cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 10 c/10cm	
30	35	16	f18 c/13cm	f10 c/10cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 8 c/6cm	
30	35	18	f18 c/15cm	f10 c/11cm	4 fi 20mm	4 fi 25mm	fi 8 c/6cm	
30	40	15	f18 c/11cm	f10 c/8cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 8 c/6cm	
30	40	16	f18 c/12cm	f10 c/9cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 8 c/6cm	
30	40	18	f18 c/14cm	f10 c/11cm	4 fi 20mm	4 fi 25mm	fi 8 c/6cm	
35	30	15	f18 c/13cm	f10 c/10cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 10 c/10cm	
35	30	16	f18 c/14cm	f10 c/10cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 10 c/10cm	
35	30	18	f18 c/15cm	f10 c/12cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 10 c/10cm	
35	35	15	f18 c/12cm	f10 c/9cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 10 c/10cm	
35	35	16	f18 c/13cm	f10 c/10cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 10 c/10cm	
35	35	18	f18 c/15cm	f10 c/12cm	4 fi 20mm	4 fi 25mm	fi 10 c/10cm	
35	40	15	f18 c/11cm	f10 c/8cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 10 c/10cm	
35	40	16	f18 c/12cm	f10 c/9cm	4 fi 20mm	5 fi 20mm	fi 10 c/10cm	
35	40	18	f18 c/14cm	f10 c/11cm	4 fi 20mm	4 fi 25mm	fi 8 c/6cm	

Tabla 9.- Resumen resultados dimensionado Losa Cruzada con vigas perimetrales

✓ **Entrepiso sin vigas**

Se tomó la losa central de 6 m x 6 m sin vigas. Debido a las tensiones cortantes en la zona de apoyos con las columnas fue necesario el uso de ábacos, los cuales en todos los casos se consideraron de 2 m x 2 m. Los resultados del diseño se muestran en la Tabla 10

	Hormigon H	Recub. (mm)	ABACO		Altura Losa (m)	ARMADURAS			
			Altura Abaco (cm)	Ancho Abaco (cm)		ARMADURA APOYO EN COLUMNAS	ARMADURA TRAMO ENTRE COLUMNAS	ARMADURA CENTRAL	
								FAJA INTERMEDIA	FAJA LATERAL
ENTREPISO/VIGA	25	30	20	200	18	fi 16mm c/10cm	fi 12mm c/12cm	fi 8mm c/15cm	fi 8mm c/15cm
	25	30	18	200	20	fi 16mm c/11cm	fi 12mm c/14/cm	fi 8mm c/13cm	fi 8mm c/13cm
	25	30	14	200	22	fi 16mm c/12cm	fi 12mm c/16cm	fi 8mm c/12cm	fi 8mm c/12cm
	25	30	12	200	24	fi 16mm c/14cm	fi 12mm c/17cm	fi 8mm c/11cm	fi 8mm c/11cm
	30	30	18	200	18	fi 16mm c/10cm	fi 12mm c/12cm	fi 8mm c/15cm	fi 8mm c/15cm
	30	30	14	200	20	fi 16mm c/11cm	fi 12mm c/14/cm	fi 8mm c/13cm	fi 8mm c/13cm
	30	30	12	200	22	fi 16mm c/13cm	fi 12mm c/16cm	fi 8mm c/12cm	fi 8mm c/12cm
	30	30	10	200	24	fi 16mm c/14cm	fi 12mm c/17cm	fi 8mm c/11cm	fi 8mm c/11cm
	35	30	16	200	18	fi 16mm c/10cm	fi 12mm c/13cm	fi 8mm c/15cm	fi 8mm c/15cm
	35	30	12	200	20	fi 16mm c/12cm	fi 12mm c/14cm	fi 8mm c/13cm	fi 8mm c/13cm
	35	30	10	200	22	fi 16mm c/13cm	fi 12mm c/16cm	fi 8mm c/12cm	fi 8mm c/12cm
	35	30	8	200	24	fi 16mm c/14cm	fi 12mm c/17cm	fi 8mm c/11cm	fi 8mm c/11cm
	25	35	22	200	18	fi 20mm c/15cm	fi 12mm c/12cm	fi 8mm c/15cm	fi 8mm c/15cm
	25	35	18	200	20	fi 16mm c/11cm	fi 12mm c/14/cm	fi 8mm c/13cm	fi 8mm c/13cm
	25	35	16	200	22	fi 16mm c/12cm	fi 12mm c/15cm	fi 8mm c/12cm	fi 8mm c/12cm
	25	35	14	200	24	fi 16mm c/13cm	fi 12mm c/17cm	fi 8mm c/11cm	fi 8mm c/11cm
	30	35	18	200	18	fi 16mm c/10cm	fi 12mm c/12cm	fi 8mm c/15cm	fi 8mm c/15cm
	30	35	16	200	20	fi 16mm c/11cm	fi 12mm c/14/cm	fi 8mm c/13cm	fi 8mm c/13cm
	30	35	12	200	22	fi 16mm c/12cm	fi 12mm c/15cm	fi 8mm c/12cm	fi 8mm c/12cm
	30	35	10	200	24	fi 16mm c/14cm	fi 12mm c/17cm	fi 8mm c/11cm	fi 8mm c/11cm
	35	35	16	200	18	fi 16mm c/10cm	fi 12mm c/12cm	fi 8mm c/15cm	fi 8mm c/15cm
	35	35	14	200	20	fi 16mm c/11cm	fi 12mm c/14cm	fi 8mm c/13cm	fi 8mm c/13cm
	35	35	10	200	22	fi 16mm c/13cm	fi 12mm c/15cm	fi 8mm c/12cm	fi 8mm c/12cm
	35	35	8	200	24	fi 16mm c/14cm	fi 12mm c/17cm	fi 8mm c/11cm	fi 8mm c/11cm
	25	40	20	200	20	fi 16mm c/10cm	fi 12mm c/13cm	fi 8mm c/15cm	fi 8mm c/15cm
	25	40	16	200	22	fi 16mm c/12cm	fi 12mm c/15cm	fi 8mm c/12cm	fi 8mm c/12cm
	25	40	14	200	24	fi 16mm c/13cm	fi 12mm c/16cm	fi 8mm c/11cm	fi 8mm c/11cm
	30	40	20	200	18	fi 20mm c/15cm	fi 12mm c/11cm	fi 8mm c/15cm	fi 8mm c/15cm
	30	40	16	200	20	fi 16mm c/11cm	fi 12mm c/13cm	fi 8mm c/13cm	fi 8mm c/13cm
	30	40	14	200	22	fi 16mm c/12cm	fi 12mm c/15cm	fi 8mm c/12cm	fi 8mm c/12cm
	30	40	12	200	24	fi 16mm c/13cm	fi 12mm c/16cm	fi 8mm c/11cm	fi 8mm c/11cm
	35	40	16	200	18	fi 20mm c/15cm	fi 12mm c/12cm	fi 8mm c/15cm	fi 8mm c/15cm
	35	40	14	200	20	fi 16mm c/11cm	fi 12mm c/13cm	fi 8mm c/13cm	fi 8mm c/13cm
	35	40	12	200	22	fi 16mm c/12cm	fi 12mm c/15cm	fi 8mm c/12cm	fi 8mm c/12cm
	35	40	10	200	24	fi 16mm c/13cm	fi 12mm c/16cm	fi 8mm c/11cm	fi 8mm c/11cm

Tabla 10.- Resumen resultados dimensionado Entrepiso sin vigas

EVALUACION DEL INDICADOR – Criterios generales y particulares adoptados para los casos analizados. Generación y CALIBRACION del Índice

Para la *generación del índice* se utilizó la metodología **MIVES** descrita. Se optó por dos requerimientos principales: sostenibilidad y durabilidad.

El primero debido a la razón principal del trabajo, comparar la sostenibilidad de distintas tipologías; el segundo debido a que se pretende dar mayor valoración a aquella estructura proyectada a durar mayor tiempo sin necesidad de grandes reparaciones o mantenimientos. La idea surge de no invertir recursos, materias primas y energía en la reconstrucción constante de nuevas estructuras, sino que las mismas perduren durante el mayor tiempo posible.

Para el requerimiento de durabilidad se considera adecuado, ya que la estructura va a ejecutarse en Olavarría bajo un ambiente normal, considerar tipo A.2, CIRSOC 201/05 ⁽⁴⁾, por lo tanto la durabilidad se verá afectada por la corrosión por carbonatación.

El requerimiento de sostenibilidad se lo dividió en sus tres pilares de valoración económica, social y medioambiental:

En el *criterio económico* se consideraron los subcriterios de Costo de Construcción y Costo de Amortización Anual: El costo de construcción se determinó a partir del valor del m² construido, para el mismo se realizó un análisis de precios unitarios, considerando valores comerciales locales y de mano de obra según las

últimas paritarias registradas. Obtenido el Costo-Costo de construcción se agregaron gastos directos (entre ellos la grúa, encofrados industrializados y alquiler de vibrador según el caso correspondiente) y como gastos indirectos un porcentaje aproximado actualmente usado por las empresas. Se sumaron los impuestos y se obtuvo el precio final de construcción del m². Para la amortización anual se consideró el precio del m², afectado por la vida útil de la estructura.

Para el *criterio social* se definieron los subcriterios de Inconvenientes Obreros y Generación de Ruidos: Se definió el subcriterio Inconvenientes Obreros a partir de las horas necesarias para que un oficial realice el trabajo, se le dará mayor beneficio a aquella estructura con menor tiempo de construcción; un mayor tiempo de construcción implica mayores tiempos de exposición a riesgos (suponiendo iguales medidas de seguridad en todos los casos) y da mayores tiempos de situaciones molestas para los vecinos. En el subcriterio de Generación de Ruidos se realizó una evaluación de las emisiones sonoras de la construcción del entrepiso a partir de los decibeles (dB) de emisiones generados a pie de obra ⁽¹⁵⁾. Para ello se definió que el momento de hormigonado, vibrado (según sea el caso) y uso de grúa es el momento de mayor generación, y según los tiempos de trabajo se evalúa la emisión según Ecuación 5.

$$Leq_{Total} = 10 \log (1/T \sum t_i 10^{0,1*Leq_i}) \quad dB(A) \quad (5)$$

Donde Leq_{total} es el nivel de presión sonora continuo equivalente combinado de ponderación A en un período de trabajo T (que es el tiempo para hormigonar todo el entrepiso); Leq_i es el nivel de presión sonora continuo equivalente individual de ponderación A, para un equipo de actividad, durante un período de ejecución t_i . Para todos se consideró el tiempo de uso de cada equipo, que corresponde a cada entrepiso dado. Es por cada entrepiso ya que este tiempo depende del volumen de hormigón de cada tipo

Generación de ruidos	de Leq_i (db)
Camión hormigonero	85
Vibrador de Hormigón	76
Grúa Fija	88

Tabla 11.- Emisión sonora de maquinaria considerada

Para el *criterio medioambiental* se consideraron tres subcriterios: Optimización de Recursos, Emisiones y Consumos. Dentro de la Optimización de Recursos se consideró la Optimización del Hormigón y del Acero, al contar con hormigón y acero prefabricado ya se cuenta con un cierto grado de reciclado y un mejor aprovechamiento de recursos por parte de las empresas proveedoras, se hizo uso de la valoración adoptada por el **ICES** e indicada en Tablas 12 y 13.

En ambos casos se consideró que la empresa constructora tiene un compromiso medioambiental. Para el hormigón, como siempre se provee de una planta, se mantuvo el mismo valor de 40 para esta evaluación; para la armadura se evaluaron dos opciones: el armado en obra (Opción 1 y 3) y el armado en un lugar fuera de la obra (Opción 2 y 4), y por lo tanto los valores varían (las empresas proveedoras locales no cuentan con distintivo medioambiental pero tienen un remarcado compromiso ambiental). Para obtener el valor de este indicador se ponderó la puntuación correspondiente (caso de utilizar armadura prefabricada la puntuación es de 60, para armadura fabricada en obra la puntuación es de 30) con los kilos totales de acero de cada caso, dando así a la puntuación final. A mayor cantidad de acero prefabricada esta puntuación mejora, pero juega en contra el mayor uso de acero con su correspondiente impacto ambiental más adelante visto. Este indicador resulta 100 para la máxima satisfacción y no 1 como nuestro caso.

OPTIMIZACION DEL HORMIGON				
Instalacion	Condicion Medioambiental	Coeficiente de Valor		
		Caso 1: Hormigon preparado	Caso 2: Hormigon in situ	Caso 3: Elemento prefabricado
Central de hormigon preparado	Con distintivo medioambiental	70	-	-
	Con compromiso medioambiental	40	-	-
	Otro casos	15	-	-
Central de hormigon in situ	Con distintivo medioambiental	-	70	-
	Con compromiso medioambiental	-	30	-
	Otro casos	-	0	-
Instalacion de prefabricacion	Con distintivo medioambiental	-	-	80
	Con compromiso medioambiental	-	-	50
	Otro casos	-	-	20
Empresa constructora	Con distintivo medioambiental	30	30	20
	Con compromiso medioambiental	15	15	10
	Otro casos	0	0	0

Tabla12: Valoración en Optimización del Hormigón

OPTIMIZACION DEL ACERO				
Instalacion	Condicion Medioambiental	Coeficiente de Valor		
		Caso 1: Armadura ajena a obra	Caso 2: Armado in situ	Caso 3: Elemento prefabricado
Armado ajeno a la obra	Con distintivo medioambiental	80	-	-
	Con compromiso medioambiental	60	-	-
	Otro casos	30	-	-
Armado in situ	Con distintivo medioambiental	-	70	-
	Con compromiso medioambiental	-	30	-
	Otro casos	-	0	-
Instalacion de prefabricacion	Con distintivo medioambiental	-	-	80
	Con compromiso medioambiental	-	-	60
	Otro casos	-	-	30
Empresa constructora	Con distintivo medioambiental	20	30	20
	Con compromiso medioambiental	10	15	10
	Otro casos	0	0	0

Tabla 13: Valoración en Optimización del Acero

En el caso de las emisiones se las subdividió en: Emisiones CO2 y Otras Emisiones (se consideran entre estas las emisiones NOx, SOx, CVO, CDK, NH3, Partículas Finas y CO), se las dividió así debido a su importancia Y para el caso de los Consumos se dividió en Consumo Energético y Consumo de Recursos Naturales (se consideran los Consumos de materias primas del Acero, Cemento, Agregados y Agua). Obviamente se le dio mayor valoración a aquella opción que permite la reducción mayor de los consumos y las emisiones y realice la mayor optimización posible. Esto se evaluó a partir de los datos mencionados anteriormente y los volúmenes totales de materiales. Como se observa en las Tablas 3 a 6, las distintas materias primas tienen distintas cantidades de emisiones y consumos. A partir de la cantidad de materiales usados por cada entrepiso se obtuvieron las emisiones y consumos totales por cada uno.

El árbol de requerimientos adoptado se muestra en Tabla 14, donde el lado derecho de la misma presenta los 20 indicadores necesarios para obtener el índice.

Sostenibilidad	Valoracion Economica	Costo de Construccion		
		Costo de Amortizacion		
	Valoracion Social	Inconvenientes Obreros		
		Generacion de Ruidos		
	Valoracion Ambiental	Optimizacion de Materiales	Optimizacion de Hormigon	
			Optimizacion de Acero	
		Emisiones	Emisiones CO2	
			Otras emisiones	Emisiones NOx
				Emisiones SOx
				Emisiones CVO
				Emisiones CDK
				Emisiones NH3
				Emision de Particulas finas
				Emisiones CO
	Consumos	Consumo Energetico		
Consumo de Rec. Naturales		Consumo de Mat. Prima de Cto.		
		Consumo de Mat. Prima de Arido		
		Consumo de Agua		
Consumo de Mat. Prima de Acero				
Durabilidad				

Tabla 14.- Árbol de Requerimientos

El resumen de los coeficientes de las funciones de valor adoptadas para cada indicador y para las tipologías analizadas se muestra en Tabla 15, la misma es producto de la evaluación de los distintos entrepisos. La forma y la tendencia de dichas funciones son adoptadas de acuerdo a Figura 1 según el tipo de indicador (a excepción de los indicadores 5 y 6 que se evalúan por puntuación y el indicador 4⁽¹⁶⁾): Se utiliza una tendencia creciente cuando la función es positiva, a mayor valor de indicador, mayor valoración, como por ejemplo el indicador 20. Años de vida de servicio (a mayores años de servicio, mayor valoración). El caso contrario de una tendencia negativa corresponde a mayor valor de indicador menor valoración, como por ejemplo el indicador 7. Emisiones CO₂ (a mayores cantidades de emisiones, menor valoración).

Para llegar a los coeficientes de la Tabla 15, se analizó cada indicador por cada entrepiso: se evaluaron los costos, impactos, emisiones, optimización de recursos, consumos y durabilidad de cada uno de los entrepisos. Se obtuvieron los valores X_i de la función de cada indicador, correspondientes a cada entrepiso. A partir de ello, se hizo hincapié en los máximos y mínimos valores de satisfacción. Estos puntos definen los límites de la función de valor en el eje de abscisas: X_{\min} (la abscisa de menor satisfacción) y X_{\max} (la abscisa de máxima satisfacción), al valor X_{\min} le corresponde la ordenada 0 y al valor X_{\max} le corresponde el valor 1. Estos valores se pueden obtener de muchas formas: a partir de normativas, experiencia, etc. Se optó por utilizar los máximos y mínimos contabilizados de la evaluación de los propios entrepisos nombrados ya que no hay una normativa especificada para los indicadores mencionados (con excepción del 4 y el 20) y no hay experiencias nacionales en el tema.

Según Ecuación 3 el valor K_i es función de los demás (n_i , m_i , A_i , X_{\min} y X_{\max}), pero n_i , m_i y A_i son desconocidos; la bibliografía recomienda un rango de valores para los mismos a partir de la forma y tendencia adoptada y los valores de máxima y mínima satisfacción (X_{\min} y X_{\max}). A partir de un proceso iterativo y respetando los valores límites de los coeficientes, se adoptaron los mismos de modo que las valoraciones finales den con la mayor variabilidad posible, de modo tal de hacer notorias las

diferencias entre los distintos entrepisos.

INDICADOR		Unidad	Tendencia	Forma	COEFICIENTES ADOPTADOS					
Num.	Descripción				X min	X max	n i	m i	A i	K i
1	Costo de Construcción	\$/m2	Decreciente	S	5943,10	2120,76	4082,07	0,5	1,5	2,83
2	Costo de Amortización Anual	\$/año.m2	Decreciente	S	58,36	8,33	33,46	0,5	2,0	1,48
3	Inconvenientes Obreros	hs	Decreciente	S	294,65	28,27	161,46	0,5	1,0	1,78
4	Generación de Ruidos	dB	Decreciente	S	0,00	150,00	90,00	4,0	11,0	1,00
5	Optimización de Hormigón	Puntos								
6	Optimización de Acero	Puntos								
7	Emisiones CO2	tCO2	Decreciente	Convexa	6,70	2,64	5,69	0,4	7,0	26,88
8	Emisiones NOx	kgNOx	Decreciente	Convexa	17,37	5,70	14,45	0,4	2,0	4,35
9	Emisiones SOx	kgSOx	Decreciente	Convexa	0,94	0,45	0,82	0,4	2,0	7,43
10	Emisiones CVO	kgCVO	Decreciente	Convexa	1,64	0,51	1,36	0,4	2,0	4,13
11	Emisiones CDK	tCDK	Decreciente	Convexa	1,26	0,29	1,02	0,4	2,0	3,28
12	Emisiones NH3	kgNH3	Decreciente	Convexa	0,0018	0,0009	0,00	0,4	1,5	5,61
13	Emisiones Partículas Finas	kg	Decreciente	Convexa	5,06	2,43	4,40	0,4	2,0	7,50
14	Emisiones CO	kgCO	Decreciente	Convexa	0,71	0,34	0,62	0,4	1,2	5,16
15	Consumo Energético	GJ	Decreciente	Convexa	51	26	45	0,4	2,0	8,57
16	Consumo de Mat. Prima de Cto.	kg	Decreciente	Concava	17512	3360	6898	0,4	2,0	1,23
17	Consumo de Mat. Prima de Arido	kg	Decreciente	Convexa	14619	6745	12651	0,4	2,0	6,97
18	Consumo de Agua	kg	Decreciente	Convexa	111953	63313	99793	0,4	2,0	11,03
19	Consumo de Mat. Prima de Acero	kg	Decreciente	Convexa	1865	885	1620	0,4	1,5	5,83
20	Años de Vida de Servicio	Años	Crecente	Concava	50	150	75	0,5	1,0	2,06

Tabla 15.- Resumen Funciones de Valor

Asignación de pesos: La asignación de pesos se realiza dentro de una misma ramificación, es decir, se comparan aspectos que sean homogéneos. Así, los pesos de los indicadores se calculan en relación a otro pertenecientes a un mismo criterio y en relación a los restantes. Los pesos de los requerimientos, criterios e indicadores se pueden determinar tanto mediante una puntuación directa (en el caso de pocos elementos componentes del grupo de comparación) como a través de la metodología AHP (Analitical Hierarchy Process– Proceso Analítico Jerárquico), que se basa en una comparación por pares de todos los elementos entre ellos. Esta comparación se hace de acuerdo a una escala propuesta por Saaty⁽¹⁷⁾, en la que se admiten las situaciones intermedias y los inversos:

1. Igual Importancia
3. Ligeramente más importante o preferido
5. Más importante o preferido
7. Mucho más importante o preferido
9. Absolutamente o extremadamente más preferido

Se comparan los distintos criterios por pares, modo tal de armar una matriz cuadrada de orden d . Dada las características de las comparaciones, se genera una matriz con una diagonal igualada a 1, y se forma el elemento inverso bajo la diagonal ya que es la comparación entre elementos pero en sentido inverso. De cada matriz de comparaciones resultante de cada bloque homogéneo (requerimientos, criterios e indicadores), el vector propio de esta matriz define los pesos de cada uno de los requerimientos, criterios e indicadores. Al existir d aspectos, se pueden obtener los d pesos para cada uno de los aspectos considerados.

La mayoría de los pesos se señalaron a partir de las bibliografías consultadas, se utilizó el método AHP para la obtención de los pesos de los criterios propios del requerimiento de sostenibilidad, para la valoración social, las emisiones y los consumos. Como la bibliografía utilizada no es Argentina, la valoración puede ser

muy distinta a la requerida en la localidad. Así que se comparó entre los requerimientos y se generó una matriz de comparación para obtener los correspondientes pesos de valoraciones en la Tabla 17.

Criterio Analizado	Criterios o indicadores incluidos	Pesos obtenidos
Valoracion Economica	Costo de Construccion	0,875
	Costo de Amortizacion	0,125
Valoracion Social	Inconv. Obreros	0,25
	Generacion de Ruidos	0,75
Sostenibilidad	Val. Economica	0,649
	Val. Social	0,072
	Val. Ambiental	0,278
Emisiones	Emisiones CO2	0,875
	Otras Emisiones	0,125
Consumos	Consumo Energetico	0,25
	Consumo de Mat. Primas	0,75

Tabla 17: Valoraciones Obtenidas con el método AHP

A partir de lo dicho anteriormente se definieron los siguientes pesos para el total de indicadores, Tabla 18:

0,8	Sostenibilidad	0,6	Valoracion Economica	0,88	Costo de Construccion				
				0,13	Costo de Amortizacion				
		0,1	Valoracion Social	0,25	Inconvenientes Obreros				
				0,75	Generacion de Ruidos				
		0,3	Valoracion Ambiental	0,2	Optimizacion de Materiales	0,50	Optimizacion de Hormigon		
						0,50	Optimizacion de Acero		
	0,4			Emisiones	0,13	Otras emisiones	0,88	Emisiones CO2	
							0,14	Emisiones NOx	
							0,14	Emisiones SOx	
							0,14	Emisiones CVO	
							0,14	Emisiones CDK	
							0,14	Emisiones NH3	
	0,14	Emision de Particulas finas							
	0,14	Emisiones CO							
0,4	Consumos	0,75	Consumo de Rec. Naturales	0,25	Consumo Energetico				
				0,25	Consumo de Mat. Prima de Cto.				
				0,25	Consumo de Mat. Prima de Arido				
				0,25	Consumo de Agua				
0,25	Consumo de Mat. Prima de Acero								
0,2	Durabilidad								

Tabla 18.- Resumen de Valoraciones

USO DE LOS INDICADORES PARA LA VALORACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LAS TIPOLOGÍAS DE ENTREPISOS ANALIZADAS

Una vez calculados los Índices se procedió, particularmente para este trabajo, a la valoración de la sostenibilidad a efectos de comparar las tipologías estructurales consideradas, incluyendo losa casetonada que forma parte del estudio más amplio que se está realizando del tema. Para ello se utilizó un valor de referencia recomendado en la bibliografía en el eje de las abscisas, que es la cuantía de acero con respecto al cemento (kg de acero/kg de cemento). A modo de ejemplo, en Figuras 3 y 4 se muestra lo indicado para hormigones H30 y HAC-30

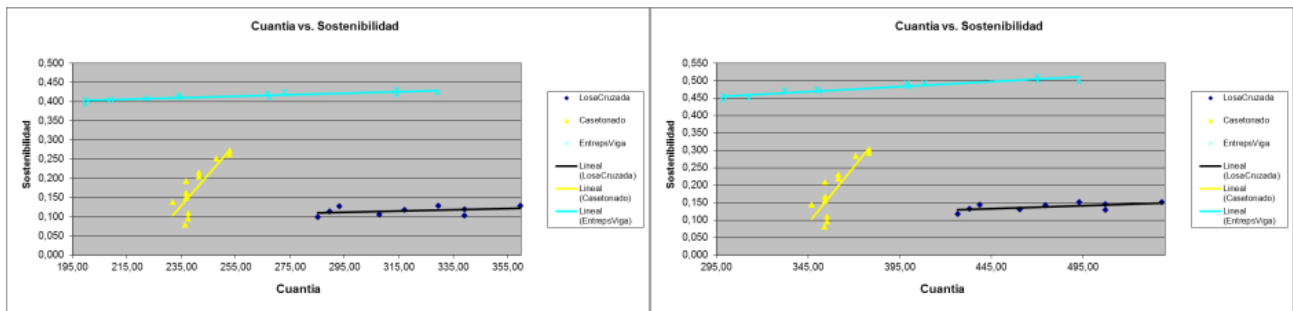


Figura 3: Valoración de Sostenibilidad para H-30 Figura 4: Valoración de Sostenibilidad para HAC-30

Se observa la ventaja en la valoración de la sostenibilidad del entrepiso sin vigas respecto a las otras tipologías estudiadas.

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

La Ingeniería Estructural debe atender en sus diseños los aspectos relacionados con la sostenibilidad. Ello requiere generar metodologías para la cuantificación de los indicadores que se adopten.

Lo expuesto en el trabajo permitió una aplicación práctica de una metodología para evaluar la sostenibilidad (si bien también se consideró también el aspecto de durabilidad) de estructuras de hormigón, que incluye subjetividades que el evaluador debe considerar y adoptar en un contexto general ampliamente discutido con los diferentes actores de la industria de la construcción. En la mayoría de los casos en que se plantearon este tipo de índices, en particular en España, se destaca la participación de los gremios, empresas constructoras y proveedoras de insumos de construcción, como asimismo representantes del estado, tanto para la valoración de criterios como para la generación de indicadores. En Argentina se debe continuar trabajando, con una mayor participación de actores.

Las Figuras 3 y 4 permiten indicar que el entrepiso sin viga tiene la mejor valoración respecto a las otras tipologías. El hormigón Autocompactante presenta soluciones más sostenibles considerando la etapa constructiva.

Puede indicarse a partir de lo desarrollado hasta el presente, que es importante continuar trabajando en esta línea, generar la toma de conciencia de la significación de ir generando acciones a nivel país para contar con valores propios como base para análisis particulares.

Es muy importante el lugar de emplazamiento de la obra, con el tema disponibilidad de insumos, transporte y energía requerida, por lo cual no es directamente aplicable el indicador a otros casos, lo que requiere un análisis similar al realizado en el presente desarrollo. La variabilidad de los indicadores es muy susceptible a los parámetros antes enunciados, razón por la cual se hace necesario ir generando estas bases de datos de aplicaciones concretas tendientes a caracterizaciones para las diferentes zonas de nuestro país.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Mario Alonso del área de Hidráulica del Departamento de Ing. Civil y al

Ing. Gabriel Blanco, del Departamento de Ing. Electromecánica, por la información brindada, a nivel local y nacional de parámetros necesarios para este desarrollo.

REFERENCIAS

- (1) Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, Secretaria General de Técnica, España. 2011
- (2) EHE-08 (2008). Anejo 13. Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad Instrucción de Hormigón Estructural.
- (3) Monografía ACHE: Sostenibilidad y Construcción – ACHE, Barcelona, febrero 2012.
- (4) CIRSOC 201/05- Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. INTI-CIRSOC. Julio 2005.
- (5) MIVES: Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones de Sostenibilidad – B. Viñolas, F. Cortes, A. Marqués, A. Josa, A. Aguado. Barcelona, 2009.
- (6) Aguado, A., del Caño, A., de la Cruz, P., Gómez, D. And Josa, A. (2011) Sustainability assessment of concrete structures. The EHE approach. Journal Construction & Management Engineering. ASCE.
- (7) Viñolas, B. (2011) “Aplicaciones y avances de la metodología MIVES en valoraciones multicriterio”. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. U.P.C. Tesis doctoral. 11.02.2011. Directores: A. Aguado y A. Josa.
- (8) Energy and Emission Reduction Opportunities for de Cement Industry – W. T. Choate.
- (9) La Industria del Cemento y la Sostenibilidad – Asociación del Cemento Portland, Buenos Aires, Octubre 2010.
- (10) Reporte de Sustentabilidad – Acindar Grupo AcerlorMittal, 2014
- (11) Variability in the environmental impacts of aggregate production – A. Jullien. El consumo de Agua en el lavado de Áridos – Juan Luis Bouso Aragónés
- (12) Emisiones de carbono del sector de transporte en Argentina – S. E. Puliafito y P. Castesana.
- (13) Hormigón: un material para aumentar la sostenibilidad de la construcción – Plataforma Tecnológica española del Hormigón.
- (14) CIRSOC 101/05. Cargas y Sobrecargas. INTI-CIRSOC
- (15) Base de Datos de Niveles de Ruido de Equipos que se usan en la Construcción, para Estudios de Impacto Ambiental – Mosquera Vega, J. Universidad Austral de Chile, 2003.
- (16) Integrated sustainability assessment method applied to structural concrete columns. Oriol Pons- Albert de la Fuente. Construction and Building Materials (49) 2013. Pp 882-893
- (17) Evaluación del Comportamiento Ambiental de Elementos Comprimidos de Hormigón – Córdoba, G; Irassar, F.- Congreso icssc 2015- LEMIT RILEM. La Plata.
- (18) The Analytical Hierarchy Process – Saaty, T. L. 1990