

UCUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN DE LA RELACIÓN COSTO/RESISTENCIA PARA
HORMIGONES ESTRUCTURALES CON EL USO DE ADITIVOS, Y CÁLCULO DE SU
SOSTENIBILIDAD MEDIANTE HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de
Ingeniero Civil

Autor:

Juan Diego Gárate Ortiz

CI: 0103976536

Correo electrónico: juan.garate2099@gmail.com

Director:

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco

CI: 0301500476

Cuenca-Ecuador

10-octubre-2022

Resumen:

El siguiente estudio busca determinar los valores óptimos de implementación de aditivos reductores de agua para la realización de hormigones, estos valores tienen como objetivo la reducción del costo total de realización de un hormigón por metro cúbico. Se diseñó un hormigón de 250 kg/cm² mediante la norma ACI (ACI 318, 2008), luego se implementó aditivos de rango medio, alto y superplastificantes siendo éstos: Plastocrete 161HE, Sikament HE200 y Viscocrete 4100 respectivamente, dosificados con el porcentaje medio y máximo según especificaciones técnicas de cada aditivo. El proceso constó en elaborar probetas cilíndricas de hormigón de 20 x 10 cm en lotes de 12 probetas por cada hormigón con diferente porcentaje de aditivo, y un lote extra de 12 probetas de hormigón base (hormigón sin aditivo). Las probetas fueron usadas para la obtención de su resistencia con ensayos de compresión y tracción indirecta a los 8, 16, 28 días de su fundición. Con el ensayo a compresión se pretende comprobar que la resistencia no se altera significativamente al mantener la relación agua cemento de la mezcla mientras se ahorra en cantidad de cemento, y el ensayo de tracción indirecta tiene como fin analizar las propiedades físico-mecánicas con el uso de aditivos, Se realizó también análisis de sostenibilidad, y de costos. Finalmente se implementó un proceso multi-criterio ponderado para determinar el hormigón más óptimo holísticamente hablando, logrando así con este estudio la determinación del mejor diseño en base a un estudio completo, robusto y altamente técnico.

Palabras claves: Hormigón. Aditivos. Sostenibilidad. Análisis de ciclo de vida.

Abstract:

The following study seeks to determine the optimal values for the implementation of water-reducing additives for structural concrete mixtures. A 250 kg/cm² control mix was designed using the ACI 318 standard from 2008, along with proposed concrete mixtures using: medium range, high range additives and superplasticizers, these being: Plastocrete 161HE, Sikament HE200 and Viscocrete 4100 respectively, dosed with the average and maximum percentage according to technical specifications of each additive. The process consisted of making 20 x 10 cm cylindrical concrete specimens in batches of 12 specimens for each concrete with a different percentage of additive, and an extra 12 control mix concrete specimens (concrete without additive). The specimens were used to determine their resistance with indirect compression and traction tests at 8, 16, 28 days after their casting. The compression test was intended to verify that the resistance is not significantly altered by maintaining the water-cement ratio of all mixtures while saving on the amount of cement, and the indirect tensile test was intended to analyze the physical-mechanical properties with the use of additives. Sustainability and cost analysis were also carried out, finally a weighted multi-criteria process to determine the most optimal concrete was implemented in order to decide the best structural concrete mix with a comprehensive and robust analysis tool.

Keywords: Additive. Compression. Concrete. Cycle.

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	1
2.1. Materiales	1
2.1.1. Cemento.....	1
2.1.2. Agregados	1
2.1.3. Aditivos	2
2.2. Métodos.....	2
2.2.1. Dosificación de la mezcla	2
2.2.2. Dosificación de aditivos.....	2
2.2.3. Ensayos en estado fresco	3
2.2.4. Ensayos en estado endurecido	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	3
3.1. Asentamiento del hormigón.....	3
3.2. Ensayos de resistencia a la compresión.....	4
3.3. Ensayos por tracción indirecta	5
3.4. Determinación de la velocidad del pulso ultra sónico	6
3.5. Costos de producción	7
3.6. Análisis de ciclo de vida LCA	7
3.7. Optimización en base a un análisis multicriterio ponderado.....	8
4. CONCLUSIONES.....	10

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo Juan Diego Gárate Ortiz en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN DE LA RELACIÓN COSTO/RESISTENCIA PARA HORMIGONES ESTRUCTURALES CON EL USO DE ADITIVOS, Y CÁLCULO DE SU SOSTENIBILIDAD MEDIANTE HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca 10 agosto 2022



Juan Diego Gárate Ortiz

C.I: 0103976536

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo Juan Diego Gárate Ortiz, autor del trabajo de titulación "ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN DE LA RELACIÓN COSTO/RESISTENCIA PARA HORMIGONES ESTRUCTURALES CON EL USO DE ADITIVOS, Y CÁLCULO DE SU SOSTENIBILIDAD MEDIANTE HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca 10 agosto 2022



Juan Diego Gárate Ortiz

C.I: 0103976536

1. INTRODUCCIÓN

La elaboración de hormigones base (hormigones cuyos únicos componentes son cemento, agregado fino o arena, agregado grueso o grava y agua) representan un costo importante en la elaboración de infraestructura debido mayormente al precio del cemento, además de que la implementación de todos los materiales involucrados en la producción de hormigón base producen cantidades significativas de contaminación (Morales, L., Alvansazyazdi, F, 2020). Aunque los aditivos reductores de agua mejoran la resistencia a la compresión de un hormigón (Quintero, Cristian & Herrera, Carlos, 2021) este puede reducir la cantidad de otros materiales, específicamente el concreto se ve reducido significativamente al bajar la cantidad de agua, especificada en la ficha técnica de cada aditivo.

Generalmente el uso de los aditivos ayuda a mejorar la resistencia de un hormigón gracias a que reducen la cantidad de agua, a su vez esta reducción puede ser empleada para reducir la cantidad de cemento dentro de una mezcla de hormigón, es así como se puede diseñar hormigones donde se obtenga una mezcla que reduzca su precio, obteniendo un porcentaje adecuado de cada material empleado para realizar dicho hormigón, para lograrlo es necesario conocer las propiedades pétreas de los materiales empleados y confeccionar un hormigón base que sea un punto de referencia y comparación respecto a los hormigones que emplean diferentes tipos y porcentajes de aditivo en su composición. Estas mezclas son sometidas a pruebas de compresión para asegurar que cumplen con una resistencia mínima, y pruebas de tracción indirecta para observar cómo se alteran sus propiedades físico-mecánicas luego de haber implementado un aditivo

El objetivo principal de este experimento es la determinación del diseño de hormigón más óptimo con diferentes porcentajes de plastificante para mejorar sus características físico mecánicas como, la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y asentamiento; el consumo energético, la producción de CO₂e y el costo de producción.

Como objetivos secundarios se realiza caracterización de los materiales pétreos y así obtener los datos necesarios, para poder replicar el experimento; diseñar un hormigón base que servirá como punto de referencia, encontrar un diseño alternativo con porcentajes de aditivo eficientes, comparar las características físico-mecánicas del hormigón base con las de los hormigones alternativos, analizar los costos del hormigón base respecto a los diseños alternativos y analizar la sostenibilidad de los hormigones alternativos.

El final de esta investigación quiere mostrar cuanto beneficio se podría obtener del uso de ciertos aditivos en mezclas de hormigón, tanto económicos como en reducción de contaminación.

A pesar de que los aditivos pueden incrementar la resistencia de un hormigón, ese no es el objetivo. La clave es mantener los valores de resistencia los más semejante al hormigón base, mientras se reduce la cantidad de cemento, por ende, su precio y su impacto ambiental.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

2.1.1. Cemento

Para la elaboración de probetas se empleó cemento hidráulico GU en cumplimiento con la norma INEN (INEN 2380, 2011) que se encuentran disponibles en todo el país. El peso específico del cemento es de 3.15 g/cm³.

2.1.2. Agregados

Los agregados empleados para la realización de las muestras fueron de dos tipos (grueso y fino). Las características de los agregados fueron obtenidas mediante las normativas ASTM C29 (2017). Los resultados obtenidos se encuentran referenciados con las siguientes características: un perfil angular para el agregado grueso, el peso unitario suelto es de 1660 kg/m³ para el agregado fino y de 1230 kg/m³ para el agregado grueso, para el peso unitario compactado se obtuvo 1775 kg/m³ para el agregado fino y 1430 kg/m³ para el agregado grueso, en el peso específico se

determinó 2372 kg/m³ para el agregado fino y 2320 kg/m³ para el agregado grueso, en el módulo de finura los ensayos mostraron un módulo de 2.84 para el agregado fino y 6.16 para el grueso, y por último el porcentaje de absorción que se obtuvo de estos materiales fue de 3.53 para el agregado fino y 2.85 para el agregado grueso.

2.1.3. Aditivos

Se utilizaron tres aditivos de la marca SIKA para la elaboración de esta investigación, de rango medio, rango alto, y super plastificante, siendo el aditivo 161 HE, HE 200 y Viscocrete 4100 respectivamente las cuales se encuentran reguladas por las normas ISO (ISO 9001, 2015) y la ASTM 494. Las propiedades más relevantes para la elaboración de este ensayo se referencian en la Tabla 1, donde se indica la dosificación mínima y máxima por peso de cemento.

Tabla 1: Características técnicas de los aditivos

Aditivos	Reducción de agua (%)	d (kg/lt)	Dosificación n min (%)	Dosificación n max (%)
161 HE	5-10	1.1	0.2	2.5
HE 200	10-25	1.2	0.5	2.5
Visc 4100	15-45	1.1	0.19	0.9

2.2. Métodos

2.2.1. Dosificación de la mezcla

El primer paso para la elaboración de esta investigación fue determinar la cantidad de materiales necesarios para elaborar la mezcla, la metodología a seguir para el diseño de los distintos hormigones se realizó mediante las consideraciones y exigencias establecidas en el código ACI (ACI 211.1, 2002). Se optó por un número de 12 probetas para la realización de los ensayos, manteniendo una relación agua/cemento de 0.52. La proporción partida de materiales determinada para obtener una resistencia mínima de 240 kg/cm² en las probetas fue de 1:2:2.7 para cemento, agregado fino y agregado grueso respectivamente, dando una cantidad de materiales en peso para un metro cúbico de hormigón de 346.6 kg de cemento, 707.8 kg de agregado fino, 952.4 kg de agregado grueso y 199.3 lt de agua, el rediseño de la mezcla, basado en la

comprobación del cumplimiento de los parámetros de partida, se modificó 1:2:2.5.

2.2.2. Dosificación de aditivos

Para poder analizar un beneficio real entre el costo y la resistencia del hormigón se optó por usar una dosificación media entre el porcentaje mínimo y máximo, y una segunda con la cantidad máxima de aditivo para el rango de aplicación según su ficha técnica, lo cual modifica a la mezcla del hormigón base reduciendo la cantidad de cemento. A partir de la dosificación obtenida para el hormigón base, se modificó a esta usando tres aditivos con un porcentaje de 1.35 % y 2.5 % ppc (por peso de cemento) reduciendo el agua de 5 % y 10% para el aditivo 161 HE, de 1.5 % y 2.5 % ppc y con una reducción de agua de 17.5 % y 2.5 % para el aditivo HE 200 y 0.55 % y 0.9 % ppc con reducción de agua de 30 % y 45 % para el Viscocrete 4100 del peso de cemento. Para la reducción del cemento se relacionó directamente los valores medios y máximos del porcentaje de reducción de agua con el porcentaje por peso del cemento que recomienda las fichas técnicas de cada uno de los aditivos.

Tabla 2: Dosificación de hormigones con diferentes porcentajes de aditivos para 1 m³ de hormigón

161 HE MED			161 HE MAX		
CEMENTO	321.6	kg	CEMENTO	315.4	kg
A. FINO	709.8	kg	A. FINO	715.4	kg
A. GRUESO	956.9	kg	A. GRUESO	964.4	kg
AGUA	186.2	lts	AGUA	182.6	lts
ADITIVO	4.3	kg	ADITIVO	7.9	kg
HE 200 MED			HE 200 MAX		
CEMENTO	308.5	kg	CEMENTO	287.6	kg
A. FINO	763.4	kg	A. FINO	783.0	kg
A. GRUESO	934.7	kg	A. GRUESO	958.7	kg
AGUA	177.3	lts	AGUA	165.3	lts
ADITIVO	4.6	kg	ADITIVO	7.2	kg
VISC 4100 MED			VISC 4100 MAX		
CEMENTO	273.0	kg	CEMENTO	226.2	kg
A. FINO	798.8	kg	A. FINO	842.6	kg
A. GRUESO	976.2	kg	A. GRUESO	1029.7	kg
AGUA	155.8	lts	AGUA	129.1	lts
ADITIVO	1.5	kg	ADITIVO	2.0	kg

Se optó por un número de 12 probetas donde la mitad fue sometida a ensayos de compresión y la otra mitad fue sometida a ensayos de tracción indirecta a edades de 8, 16 y 28 días a por cada dosificación escogida para la realización de ensayos.

2.2.3. Ensayos en estado fresco

Una vez elaborada la mezcla, tanto la mezcla de hormigón base como las muestras con aditivo, fueron sometidas al ensayo de asentamiento, siguiendo los parámetros de la normativa INEN (INEN 1578, 2010).

2.2.4. Ensayos en estado endurecido

Las propiedades mecánicas de los hormigones realizados en 7 lotes de 12 probetas endurecidas en dos tipos de ensayos, destructivos y no destructivos. En los ensayos destructivos las probetas fueron sometidas a los ensayos de compresión y tracción indirecta mediante el uso de las normas INEN 1573 (2010) y ASTM C 496 (2011) respectivamente. En los ensayos no destructivos se realizaron pruebas de ultrasonido de manera directa en las probetas, siguiendo los parámetros de la norma ASTM D 2845 (2005). Siguiendo con los ensayos destructivos se realizaron ensayos a los 8, 16 y 28 días luego de haber fundido la mezcla, en dos repeticiones para cada ensayo y para los ensayos no destructivos se realizaron mediciones con equipo de ultrasonido de 3 probetas para cada lote realizado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Asentamiento del hormigón

En la figura 1 muestran los resultados diferentes asentamientos producidos por las mezclas. La trabajabilidad o asentamiento no se vio muy afectada por la implementación de aditivos, exceptuando por el super plastificante Viscocrete 4100 el cual tiene unos valores de asentamiento superiores a la media.

Los valores de asentamiento se mantuvieron entre 2.1-5.5 cm siendo los hormigones donde se implementaron los super plastificantes los que poseen los valores más altos de trabajabilidad, para dosificaciones de 0.55 % y 0.9 % por peso de cemento.

En esta parte del experimento se pudo observar notables diferencias respecto a la consistencia, siendo en el caso del super plastificante que se obtuvo una consistencia viscosa (típica reacción en presencia de aditivos a base de policarboxilatos) en

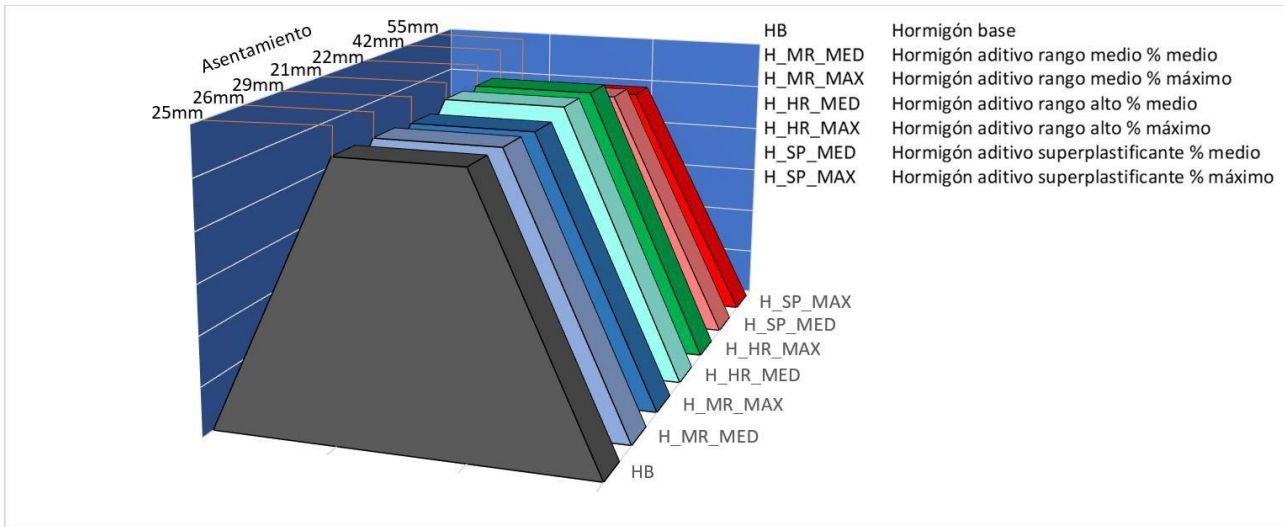


Figura 1: Asentamiento de hormigones para diferentes porcentajes de aditivo

la mezcla, notable diferencia con los aditivos de medio y alto rango (161 HE y HE 200 respectivamente) que presentaron una consistencia pastosa y en el caso del aditivo HE 200 se obtiene una mezcla incluso más seca respecto al hormigón base.

Como se puede observar en la figura 1 el aditivo HE 200 presenta el menor asentamiento (21 y 22 mm) del hormigón, haciendo que sea menos manejable la mezcla durante el modelado y compactación de las probetas como lo indica la norma ACI 318 (2008).

3.2. Ensayos de resistencia a la compresión

Para el ensayo de compresión se realizaron ensayos sobre las probetas a edades de 8, 16 y 28 días de curado, como lo indica la norma ASTM C 39 (2012). El diseño base contempla una resistencia de 250 kg/cm² en la figura 2 se muestran las resistencias a compresión correspondientes.

Para la validación de los datos se optó por la realización de dos ensayos de compresión en dos probetas diferentes, para un mismo día de curado. Los resultados indican que no hay mucha variación entre los valores máximos y mínimos respecto a la resistencia promedio de los hormigones, dando como resultado los valores indicados en la tabla 3.

Tabla 3: Ensayo de prueba de compresión a los 8, 16 y 28 días para porcentajes medios y máximos de aditivo

Edad (día)	Resistencia a la compresión (f'c=kg/cm ²)						
	HB	H_MR		H_HR		H_SP	
		MED	MAX	MED	MAX	MED	MAX
8	156	159	157	154	168	152	164
16	203	220	218	212	227	215	247
28	251	246	255	257	260	262	296

HB: Hormigón base

H_MR: Hormigón con aditivo de rango medio

H_HR: Hormigón con aditivo de rango alto

H_SP: Hormigón con aditivo superplastificante

Los resultados indican un aumento en la resistencia como lo indica la figura 2, debido a la modificación de la cantidad de cemento agregado a la mezcla, a pesar de que se mantuvo la misma relación agua cemento respecto al hormigón base. El tipo de aditivo muestra que mientras más alto sea el rango de disminución de agua que tiene, mayor será el aumento de resistencia, como era de esperarse.

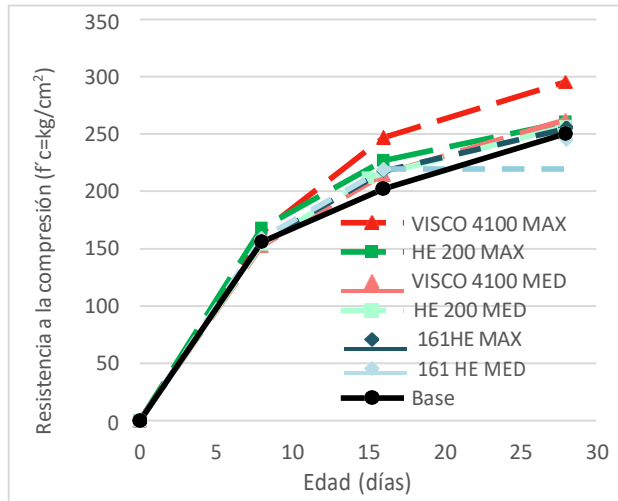


Figura 2: Curvas de endurecimiento para hormigones con diferentes aditivos

Podemos observar que la resistencia inicial a los ocho días de curado no presenta una gran diferencia con el hormigón base, es desde los dieciséis días que se empieza a ver diferencias significativas entre las mezclas de hormigón. Por otra parte, la mezcla en la que se usó el super plastificante Viscocrete 4100 con un porcentaje máximo por peso de cemento, muestra un incremento de resistencia significativo.

Se puede evidenciar que el uso de super plastificante en grandes cantidades recomendadas mejora notablemente la resistencia a compresión de los hormigones a los 28 días de curado, pese a disminuir la cantidad de cemento de la mezcla. Estos incrementos de resistencia significativos se obtienen al usar un 0.9 % de aditivo por peso de cemento del Viscocrete 4100. Siguiendo el orden de resistencia a compresión más importantes están el uso de aditivo de rango medio HE 200 en porcentaje de 2.5 % de aditivo por peso de cemento y el Viscocrete 4100 con un porcentaje de 0.55 % de aditivo por peso de cemento.

3.3. Ensayos por tracción indirecta

La resistencia a la tracción indirecta viene a ser una de las propiedades fundamentales del concreto que puede relacionarse con la resistencia a la compresión (Silva, 2014). Lo cual se muestra en los resultados obtenidos en los ensayos realizados

sobre las probetas en estado endurecido a los 8, 16 y 28 días.

Se pudo observar que las probetas sometidas a este ensayo presentan fisuras que van desde la parte central de la probeta hasta los apoyos en dirección de la carga aplicada.

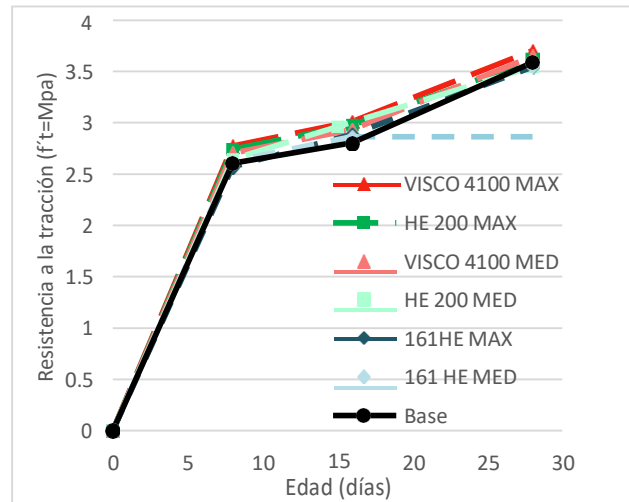


Figura 3: Curva de ensayo a tracción de hormigones con diferentes porcentajes de aditivo

Respecto a los resultados de este ensayo, se mantuvo un comportamiento bastante similar entre el hormigón base y los hormigones que empleaban distintos aditivos esto se evidencia en la figura 3. En cuanto a las fisuras de falla resultantes del ensayo, éstas se producen en un lugar atípico (desplazadas del centro), debido a la porosidad acumulada en los extremos de la muestra de hormigón con HE 200.

Tabla 4: Ensayo de prueba de tracción indirecta a los 8, 16 y 28 días para porcentajes medios y máximos de aditivo

Edad (días)	Resistencia a la tracción indirecta (f't=Mpa)						
	HB	H_MR		H_HR		H_SP	
		MED	MAX	MED	MAX	MED	MAX
8	2.60	2.65	2.74	2.71	2.77	2.62	2.57
16	2.81	2.96	2.98	3.01	2.87	2.87	2.89
28	3.59	3.55	3.61	3.70	3.54	3.54	3.54

Los datos obtenidos y mostrados en la tabla 4 indican que el aditivo de alto rango HE 200 produce un hormigón más resistente en este ensayo para un curado de 28 días, seguido del aditivo de medio rango 161 HE y super plastificante Viscocrte 4100. Aunque hay que resaltar estas variaciones no son muy representativas y por lo tanto muestran un comportamiento muy similar en su resistencia a la tracción indirecta como lo indica la figura 3.

3.4. Determinación de la velocidad del pulso ultra sónico

Según Cedeño (2015) la calidad de un hormigón convencional se puede catalogar como buena cuando cuenta con una velocidad de 3861 m/s, información corroborada con otras referencias que catalogan la calidad del hormigón en rangos (Jiménez, García y Morán, 2000). Los datos obtenidos se expresan en la Tabla 5. Los resultados del ensayo establecen que los hormigones realizados se manejan en un rango de calidad entre bueno a aceptable.

Tabla 5: Calidad del Hormigón con diferentes porcentajes de aditivos para rangos de velocidad de pulso ultrasónico

Tipo de Hormigón	t (μs)	L (cm)	v (m/s)	Calidad												
HORMIGÓN BASE	50.3	19.8	3980	BUENO												
	52.4	19.8	3820	BUENO												
	51	19.8	3890	BUENO												
HORMIGÓN 161 HE % MED	51	19.8	3890	BUENO												
	58.3	19.8	3430	ACEPTABLE												
	48.3	19.8	4140	BUENO												
HORMIGÓN 161 HE % MAX	58.4	19.8	3430	ACEPTABLE												
	50.3	19.8	3980	BUENO												
	53.4	19.8	3750	BUENO												
HORMIGÓN HE 200 % MED	64.3	19.8	3110	ACEPTABLE												
	62.2	19.8	3220	ACEPTABLE												
	64.4	19.8	3110	ACEPTABLE												
HORMIGÓN HE 200 % MAX	62.3	19.8	3210	ACEPTABLE												
	52.4	19.8	3820	BUENO												
	52.4	19.8	3820	BUENO												
HORMIGÓN 4100 % MED	52	19.8	3850	BUENO												
	50.9	19.8	3930	BUENO												
	50	19.8	4000	BUENO												
HORMIGÓN 4100 % MAX	61.5	19.8	3250	ACEPTABLE												
	62.1	19.8	3220	ACEPTABLE												
	60.1	19.8	3330	ACEPTABLE												
<table border="0"> <tr> <td>v (m/s)</td> <td>Referencia</td> </tr> <tr> <td>>4500</td> <td>EXCELENTE</td> </tr> <tr> <td>3600-4500</td> <td>BUENO</td> </tr> <tr> <td>3000-3600</td> <td>ACEPTABLE</td> </tr> <tr> <td>2100-3000</td> <td>MALO</td> </tr> <tr> <td><2100</td> <td>MUY MALO</td> </tr> </table>					v (m/s)	Referencia	>4500	EXCELENTE	3600-4500	BUENO	3000-3600	ACEPTABLE	2100-3000	MALO	<2100	MUY MALO
v (m/s)	Referencia															
>4500	EXCELENTE															
3600-4500	BUENO															
3000-3600	ACEPTABLE															
2100-3000	MALO															
<2100	MUY MALO															
Rangos de calidad según Jiménez, García y Morán, 2000																

Se puede observar una tendencia un poco marcada que dicta que al aumentar el porcentaje de aditivo y aproximarse a su límite máximo el hormigón baja la calidad determinada por este ensayo. Estos resultados se deben ya que, al aumentar la cantidad de aditivo se reduce drásticamente la cantidad de agua lo que afecta la porosidad, otorgándonos hormigones que, si bien son más resistentes, también se secan con mayor rapidez, lo cual puede generar fisuras en las probetas.

3.5. Costos de producción

Los valores obtenidos en la tabla 7 indican el costo de producción en materiales de un metro cúbico de hormigón con diferentes porcentajes de aditivos. Estos resultados muestran que el aditivo que reduce más los costos de producción es el super plastificante Viscocrete 4100 seguido del aditivo de medio rango 161 HE, no obstante, se produce un costo adicional con el uso del aditivo de alto rango HE 200. Esta diferencia de precios tan marcada se debe a los precios a granel que maneja la compañía SIKA, dando unos precios a granel de 2.00 \$/kg al aditivo 161 HE, 3.80 \$/kg al aditivo HE 200 y 3.60 \$/kg al Viscocrete 4100. Para la obtención de estos resultados solo se modificó la cantidad de cemento y agua en la mezcla, dejando intacto los pesos de agregado fino y grueso conociendo de antemano que las variabilidades en las cantidades de agregados son mínimas y que sus influencias en el cálculo de los costos son relativamente insignificantes.

3.6. Análisis de ciclo de vida LCA

Los datos presentes en la tabla 6 se obtuvieron del cálculo de la cantidad de energía y CO₂e que se produce por la construcción de una vía con capa de pavimento PCC (pavimento rígido de cemento portland) ubicada en la ciudad de Cuenca en el sector de Narancay. La vía está compuesta de 4 carriles con un ancho total de 14.8 m con una capa de cemento de 240 mm y una capa de subbase de 100 mm, para un recorrido total de 10 km.

Dado que para poder determinar la huella de carbono y el consumo energético que produce y ocupa este proceso de construcción, se necesita obtener las cantidades de material empleado, las distancia que hay de la fuente de los materiales a

la planta procesadora, la distancia que hay de la planta al lugar donde se realizará la construcción que para este ejemplo se tomará a la fábrica de cemento Guapán, ubicada en la ciudad de Azogues, además de la maquinaria que se empleó para realizar la obra. Estos parámetros son los empleados para determinar el coste energético y las cantidades de CO₂e producidas por los procesos de construcción. Las ecuaciones 1 y 2 otorgadas por el software PaLATE v2.0 (2011) y la tesis de Albornoz Muñoz (2015), son las utilizadas para cálculo de estos parámetros.

$$E = \sum [(T \times k_1) + (\frac{T}{d} \times FC \times k_2)] \quad (1)$$

Donde:

E: energía

T: toneladas fuerza del material

K1: coeficiente de distancia por tipo de material

K2: Factor de conversión

d: densidad (ton/CY)

FC: consumo de combustible

$$HC = \sum V \times FE \quad (2)$$

Donde:

HC: huella de carbono CO₂e[kg]

V: volumen

FE: factor de emisión

Las equivalencias de la tabla 6 se obtiene gracias al informe del Diario de la república de Portugal (Despacho n.º 17313, 2008) En este informe se indica que el factor de emisión (FE) resulta de la proporción entre la energía usada y la emisión de CO₂e. Por lo tanto, debido a la conversión de unidades se establece que el valor de un tep (toneladas equivalentes de petróleo) es tep=41.868 GJ.

Los datos de la tabla 6 indican según Diario de la república de Portugal (Despacho n.º 17313, 2008) que el FE obtenidos de cada mezcla de hormigón para la construcción de una vía de 10 km se encuentra entre un esquistos bituminoso y residuos industriales. Esta equivalencia nos indica que realizar este tipo de obra es equiparable al uso de estos combustibles, como se indica en el Diario de la república de Portugal.

Para interpretar estos datos de una manera más real, se equiparo su consumo energético con el consumo realizado por 8,502,910 focos de 60 Watts durante 24 horas o 1,094,605 Buses urbanos que recorren 100 km para un hormigón normal y

6,422,306 focos o 880,884 Buses urbanos que recorren 100 km para el hormigón al que se incorporó el porcentaje máximo de aditivo Viscocrete 4100. De elegir el hormigón de porcentaje máximo Viscocrete 4100 se daría un ahorro energético equivalente a 2,080,604 focos de 60 Watts encendidos durante 24 horas.

Tabla 6: Análisis del ciclo de vida de mezclas de hormigón con diferentes porcentajes de aditivo

HORMIGÓN	E [GJ]	CO ₂ e[kg]	FE [kgCO ₂ e/GJ]	tep
SIN ADITIVO	44079	5363565	122	1053
161HE MED	39286	4671991	119	938
161HE MAX	35593	4250841	117	874
HE200 MED	38453	4534149	112	918
HE200 MAX	37143	4316335	116	887
4100 MED	36233	4164070	115	865
4100 MAX	33293	3675540	110	795

De la misma manera todos estos valores se pueden traducir al consumo energético hecha para la ciudad de Cuenca con número de 810000 habitantes, tomando como datos el consumo energético por persona dados por el portal web de la empresa eléctrica Centro sur, nos da como resultado que realizar un proyecto de estas magnitudes equivalen a 5 veces el consumo energético de la ciudad de Cuenca durante una hora para un hormigón sin incorporación de aditivo y cuatro veces para un hormigón que incorpore aditivos a su mezcla.

3.7. Optimización en base a un análisis multicriterio ponderado

Para poder determinar el hormigón más óptimo respecto a los parámetros de: precio, resistencia, asentamiento, consumo energético, producción de CO₂e y conductividad, es necesario determinar el peso de cada parámetro en porcentaje mediante un análisis multi-criterio, este análisis tomó en cuenta la importancia de cada parámetro respecto a los otros, dando como resultado los porcentajes que se

emplearon para la ponderación de los resultados finales.

Se tomó ciertos criterios para la obtención del Ranking de las mezclas de hormigón, el primero es que todos los hormigones fueron puntuados en una escala del 1-10 siendo el hormigón de 10 el que más optimizado respecto a todos los parámetros, así también se hizo lo mismo para cada parámetro individualmente otorgándole una puntuación del 1-10 respecto a los diferentes tipos de mezclas. Resumiendo, para los parámetros como resistencia el valor más alto equivale a un puntaje de 10, y en el caso de parámetros como costo se puntuó con 10 al más económico o menor y 5 al más costoso o mayor.

Los resultados que se obtuvo para cada mezcla se listan a continuación con su respectivo promedio.

Tabla 7: Costo para m³ de hormigón con diferentes porcentajes de aditivo

Costos de producción				% MED		%MAX		% MED		%MAX		% MED		%MAX	
Tipo de aditivo		Sin aditivo		MR: 161 HE		MR: 161 HE		HR: HE 200		HR: HE 200		SP: Viscocrete 4100		SP: Viscocrete 4100	
Material	Unidad	Precio unitario	costo mezcla/m ³	Precio unitario	costo mezcla/m ³	Precio unitario	costo mezcla/m ³	Precio unitario	costo mezcla/m ³	Precio unitario	costo mezcla/m ³	Precio unitario	costo mezcla/m ³	Precio unitario	costo mezcla/m ³
Cemento	kg 0.1	56.54	0.16		52.55	0.16	51.53	0.16	50.40	0.16	47.00	0.16	44.60	0.16	36.97
Agg. Fino	m ³	11.00	4.58	11.00	4.58	11.00	4.58	11.00	4.58	11.00	4.58	11.00	4.58	11.00	4.58
Agg. Gru	m ³	7.00	2.78	7.00	2.78	7.00	2.78	7.00	2.78	7.00	2.78	7.00	2.78	7.00	2.78
Agua	m ³	0.48	0.01	0.48	0.01	0.48	0.01	0.48	0.01	0.48	0.01	0.41	0.01	0.41	0.01
Aditivo	lt	0	0.00	1.82	8.68	1.82	15.77	3.17	17.58	3.17	27.32	3.27	5.36	3.27	7.33
Costo total		64.02		68.62		74.68		75.37		81.70		57.34		51.68	
		Ganancia	\$/m ³	-4.60		-10.66		-11.34		-17.68		6.68		12.34	

Tabla 8: Ranking de hormigones con incorporación de aditivo para una vía de PCC de 10 km

Hormigón	PR1	PR2	PR3	PR4	PR5	PR6	R/10
%	5	31	9	23	23	9	
SIN ADITIVO	2274027	251	25	44079	5364	3897	6.67
161HE MED	2437253	246	26	39286	4672	3820	7.54
161HE MAX	2652737	255	29	36593	4284	3720	8.15
HE200 MED	2676995	257	21	38453	4316	3147	7.69
HE200 MAX	2902017	260	22	37143	4316	3617	7.94
4100 MED	2036710	262	42	36233	4164	3927	8.76
4100 MAX	1835552	296	55	33293	3676	3267	9.84

PR1	PRECIO	\$
PR2	RESISTENCIA	kg/cm ²
PR3	ASENTAMIENTO	Mm
PR4	CONSUMO ENERGÉTICO	GJ
PR5	PRODUCCIÓN DE CO ₂ e	CO ₂ e[Ton]
PR6	VELOCIDAD	m/s
R/10	RANKING	1-10
	PESOS DE IMPORTANCIA	%

4. CONCLUSIONES

En conclusión, basándonos en la jerarquización lograda en el listado de mezclas, se concluye que con el uso de los super plastificantes como elViscocrete 4100 se logra el hormigón más óptimo holísticamente hablando, pues es el más recomendable en cuanto resistencia, consumo energético,

producción de CO₂e, asentamiento, conductividad y costo; al obtener el mejor ranking de 8.44/10 como se observa en la tabla 8.

A pesar de mantener la misma relación agua agua/cemento en todas las mezclas, estas presentan unas diferencias respecto a sus resistencias a compresión, valores que oscilan entre 250 Kg/cm² para el hormigón base y 296 Kg/cm² para el hormigón que incorpora el máximo porcentaje de aditivo Viscocrete 4100, esto indica que la implementación de un aditivo incrementa su resistencia a pesar de usar la misma relación agua cemento respecto a los ensayos de compresión.

Respecto a la resistencia a tracción los resultados oscilan entre 3.54 Mpa y 3.70 Mpa para los aditivos HE 200 con un porcentaje medio de incorporación de aditivo y el Viscocrete 4100 con un porcentaje máximo de incorporación de aditivo para la prueba de los 28 días respectivamente, estos resultados se mantendrían dentro a la resistencia obtenida por el hormigón base de 3.59 Mpa, dado que los valores obtenidos en el ensayo de tracción indirecta están sobre y bajo los valores del hormigón base y que hay una diferencia de 0.11 Mpa, se podría decir que las características de tensión no se ven muy afectadas por el uso de aditivos.

En el caso del asentamiento la consistencia que se logró con el aditivo Viscocrete 4100 le otorgó una mejor trabajabilidad dando como resultado un asentamiento de 55 mm.

Respecto al ensayo de ultrasonido los resultados son más variables, siendo los hormigones de mejor calidad el hormigón base que no incorpora aditivo y el

hormigón que tiene incorporado un porcentaje medio del aditivo Viscocrete 4100 dando una velocidad promedio de 3987 m/s y 3927 m/s respectivamente, lo que cataloga estos hormigones como de buena calidad.

Los cálculos realizados por medio del software PaLATE v2.2 for Greenroads 2011 indican que los hormigones que incorporan aditivos a su mezcla tienen una mejor sostenibilidad respecto a un hormigón que no reduce la cantidad de cemento en su dosificación, esto se comprueba al revisar que los factores de emisión FE de los hormigones con aditivos, ya que estos son menores a 122 kgCO₂-e/GJ correspondiente al factor de emisión del hormigón base, siendo el hormigón más sostenible el que incorpora el máximo porcentaje de aditivo Viscocrete 4100 dándonos el menor factor de emisión, de 110 kgCO₂-e/GJ como se indica en la tabla 6.

En el apartado energético, este se relaciona directamente con la sostenibilidad, por lo tanto, el hormigón que incorpora un aditivo con porcentaje máximo del Viscocrete 4100 produce un menor consumo energético, logrando un ahorro energético de 10,786 GJ respecto a un hormigón que no incorpora aditivo, o dicho de otra manera se realiza el ahorro equivalente a la energía que utilizarían 2,080,604 focos de 60 Watts encendidos durante una hora, para la vía de 10 km analizada.

Respecto a las emisiones de CO₂-e este también se encuentra ligado a lo que es la sostenibilidad, así mismo el hormigón que incorpora el máximo porcentaje de aditivo Viscocrete 4100 es el que produce menores emisiones de CO₂ reduciendo

las cantidades de CO₂-e a 1,688,026 CO₂-e[kg] o también se lo puede representar como sacar de circulación a 213,761 buses que realizan un recorrido de 100 km.

En cuanto a costos de producción, las únicas muestras de hormigón que presentaban un ahorro, fueron las que incorporan el aditivo Viscocrete 4100, siendo éste de 6.68 \$/m³ para el porcentaje medio y 12.34 \$/m³ para el porcentaje máximo.

REFERENCIAS

- [1] ACI Committee. (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute.
- [2] Albornoz Muñoz, J. F. (2015). Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile.
- [3] ASTM C29. Determinación de la densidad aparente (masa unitaria) e índice de vacíos en los agregados.
- [4] ASTM C29. Peso específico de los agregados gruesos.
- [5] Arguedas Garro, C. E. (2021). Estudio de datos relativos a emisiones de CO₂ en materiales de construcción como estrategia para la rehabilitación de fachadas con bajo impacto ambiental (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- [6] Cedeño, C. G. B., Hermosa, G. V. L., & Aguas, L. M. M. (2015). Efecto de la Sustitución de Agregado Fino por Ceniza Proveniente del Proceso de Incineración en Bruto de Residuos Sólidos Industriales en la Elaboración de Hormigón de Baja Resistencia. *Revista Politécnica*, 36(3), 86-86.
- [7] *Cemento Guapán - UCEM – Unión Cementera Nacional*. (s/f). UCEM – Unión Cementera Nacional.

- Recuperado el 8 de abril de 2022, de <https://www.ucem.com.ec/categoria-producto/cemento-quapan/>
- [8] Cementos hidráulicos. Requisitos de desempeño de cementos hidráulicos, NTE INEN 2380, 2011.
- [9] Demandas de consumo eléctrico. Gob.ec. Recuperado el 29 de abril de 2022, de <https://geoportal.centrosur.gob.ec/geoportal/autocad/ARCGIS/CUADRO%20DE%20DEMANDAS%20M%C3%81XIMAS%20DIVERSIFICADAS.pdf>
- [10] Despacho n.º 17313/2008. (26 de Junho de 2008). Publicação dos fatores de conversão para tonelada equivalente petróleo (tep) e dos fatores para cálculo da Intensidade Carbónica pela emissão de gases com efeito de estufa, referidos a quilograma de CO₂ equivalente. Diário da República, 2.ª série — N.º 122, pp. 27912-27913.
- [11] Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento, NTE INEN 1578, 2010.
- [12] Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico, NTE INEN 1573, 2010.
- [13] ISO 9001:2015 Quality management systems - Requirements, ISO, 2015.
- [14] Jiménez P. García, A. y Morán, F. "Hormigón Armado". (14va. ed.). Barcelona, España: Gustavo Gil, S.A, 2000, p. 122.
- [15] Método de ensayo normalizado para resistencia a la tracción indirecta de especímenes cilíndricos de concreto, ASTM Standard C 496, 2011.
- [16] Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio de las velocidades de pulso y las constantes elásticas ultrasónicas de roca, ASTM Standard D 2845, 2005.
- [17] Morales, L., Alvansazyazdi, F., Landázuri, P., & Vásconez, W. (2020). Prevención de la contaminación por la fabricación de hormigones con nanopartículas. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, (E30), 309-324.
- [18] Movilidad-idae.es. Recuperado el 9 de mayo de 2022, de <https://www.movilidad-idae.es/destacados/emisiones-de-co2-por-modos-de-transporte-motorizado>
- [19] Norma ASTM C39/39M-12a, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. Book of ASTM Standards. Vol. 04.02 (EEUU): American Society for Testing and Materials, 2012.
- [20] Norma ASTM C496/C496M-11, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. C 496-90, Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.02 (EEUU): American Society for Testing and Materials, 2011.
- [21] Práctica Estándar para seleccionar el proporcionamiento de concreto de peso normal, pesado y masivo, ACI Standard 211.1, 2002.
- [22] QUINTERO VEGA, C. R. I. S. T. I. A. N., & HERRERA RUEDA, C. A. R. L. O. S. (2021). *ADITIVOS REDUCTORES DE AGUA DE ALTO RANGO O SUPERPLASTIFICANTES Y SU EFECTO EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO* (Doctoral dissertation).
- [23] Sanguinetti, C. M., & Ortiz, F. Q. (2014). Análisis de Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación del hormigón

premezclado. Caso estudio planta productora Región del Bío Bío, Chile. *Hábitat Sustentable*, 16-25.

- [24] Silva et al., "Obtención de concretos autocompactantes empleando residuos de demolición". *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 2014.

- [25] PaLATE v2.2 for Greenroads 2011. Software and user guide modified by Civil & Environmental neering Department, University of Washington (UW).