

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DEL HORMIGÓN EN LOSAS TIPO DECK, UTILIZANDO FIBRAS DE ACERO VS. MALLA ELECTROSOLDADA

Wilson Cando^{1*}, Sebastián Constante¹

¹Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Quito, Ecuador

*Autor para correspondencia: wocando@puce.edu.ec

Recibido: 2021/06/08

Aprobado: 2021/09/10

DOI: <https://doi.org/10.26621/ra.v1i25.704>

RESUMEN

Esta investigación consiste en determinar la efectividad del reemplazo del acero de refuerzo con malla electrosoldada, utilizada convencionalmente en losas con placa colaborante (Steel Deck), por fibras de acero Dramix®, para el control de fisuras en la superficie del hormigón.

Se evaluó el comportamiento de ambas opciones, frente a la contracción y dilatación que se produce, debido a agentes externos de temperatura, humedad y viento, con la finalidad de determinar el sistema más eficiente en términos económicos, técnicos y constructivos.

Para la comparación técnica se utilizó la normativa de ensayo ASTM C1579; para la comparación económica se realizó el análisis de precios unitarios (APU) en ambos casos. La determinación de la eficiencia constructiva se la evaluó a partir de referencias bibliográficas. Para el análisis técnico, se utilizaron normativas de ensayo complementarias; para determinar las propiedades mecánicas de los materiales, normativa ASTM; finalmente para la dosificación del hormigón, se empleó normativa del Instituto Americano del Concreto (ACI).

Los resultados obtenidos son los siguientes: en cuanto al análisis técnico, la fisuración en las losetas de hormigón, reforzadas con fibras de acero, se redujo en un rango del 21% al 29% frente a aquellas que fueron reforzadas con malla electrosoldada; el análisis económico, en el primer caso, resultó en un ahorro aproximado del 1.4% del costo con respecto al segundo; el análisis constructivo demuestra que; también se obtuvieron resultados positivos en el caso del hormigón con fibras de acero, debido a reducción en rubros, tiempos, logística y riesgos laborales.

Se concluyó así que, en los tres casos, las fibras de acero tienen mayores ventajas, para los fenómenos estudiados, frente a la tradicional malla de acero electrosoldada.

De forma adicional, se concluyó también que, cualquier método de refuerzo de losas con placa colaborante, así como un buen acabado superficial y un correcto curado del hormigón, son necesarios para reducir la fisuración en estas.

Palabras clave: Hormigón, losa con placa colaborante, Steel Deck, fibra de acero, malla electrosoldada, fisuras del concreto

ABSTRACT

This research means to establish how effective the replacement of reinforcing steel with electro-welded mesh, conventionally used in composite steel floor decks, by Dramix® steel fibers, to control cracks in the concrete surface. The behavior of both options was evaluated, based on the contraction and expansion that occurs due to external agents of temperature, humidity, and wind, to determine the most efficient system in economic, technical, and constructive terms.

For the technical comparison, the standard ASTM C1579 was used; for the economic comparison, the unit price analysis (UPA) was applied in both cases. The determination of the constructive efficiency was evaluated from bibliographic references. For the technical analysis complementary standards were used, to determine the mechanical properties of the materials the ASTM standards were applied and for the dosage of concrete ACI regulations.

The obtained results are: in terms of technical analysis, cracking in concrete tiles reinforced with steel fibers, was reduced in a range of 21% to 29% compared to those that were reinforced with electro-welded mesh; the economic analysis: in the first case, resulted in an approximate saving of 1.4% of the cost compared to the second; the constructive analysis shows that positive results were also obtained in the case of concrete with steel fibers, due to a

reduction in items, times, logistics and occupational risks. It was thus concluded that, in the three cases, steel fibers have greater advantages, for the phenomena studied, compared to electro welded steel mesh.

It was also concluded that any method of reinforcing composite steel floor decks, as well as a good surface finish and correct curing of the concrete, are necessary to reduce cracking.

Keywords: Concrete, composite steel floor decks, steel fiber, electro welded mesh, concrete cracking

INTRODUCCIÓN

Se ha podido apreciar que en los últimos años la utilización del sistema de losas colaborantes o "Steel Deck" se ha incrementado a nivel mundial, tanto en construcciones de acero como en las de hormigón armado y mixtas. Según varios constructores, en la instalación de dicha tecnología de construcción se pueden presentar varias dificultades constructivas debido al uso de la malla electrosoldada para el control de agrietamiento por contracción y temperatura del concreto.

Se propone entonces como hipótesis del trabajo el reemplazo de dicha malla por la aplicación de fibras de acero, pues este podría resultar más conveniente al ser mezclado directamente con el hormigón tanto in-situ como en planta.

En una entrevista realizada el 8 de octubre del 2017, el ingeniero Pedro Zevallos, asesor comercial de turno de la empresa Ideal Alambrec-Bekaert, afirma que "existen países en los que ya se está utilizando este sistema y en el Ecuador se ha utilizado pocas veces".

Se pretende entonces determinar cuán efectivo podría resultar el reemplazo de dicha malla, utilizada convencionalmente en el sistema de losas con placa colaborante, por fibras de acero Dramix®, con el fin de controlar fisuras en la superficie del hormigón.

El presente trabajo pretende pues evaluar el comportamiento de ambas opciones frente a la contracción y dilatación que se produce en el hormigón únicamente debido a agentes externos de temperatura, humedad y viento con la finalidad de determinar qué sistema es más eficiente tanto en términos económicos, como técnicos y constructivos. La comparación técnica se la realizó mediante el ensayo de laboratorio determinado por la normativa de ensayo ASTM C1579 denominada "Método de Ensayo Estándar para la Evaluación del Agrietamiento por Contracción Plástica de Concreto Reforzado con Fibras (Usando Inserción de Acero)."

"El ensayo compara el agrietamiento superficial de paneles de concreto reforzado con fibra, con paneles de concreto de control, sometidos a condiciones (...) lo suficientemente severas como para agrietarlo antes del fraguado final del concreto." (ASTM, 2013)

Al método de ensayo se lo adaptó ligeramente, para poder compararlo con el concreto que utiliza malla electrosoldada para el control del fisuramiento, es decir se ensayaron también paneles de concreto reforzado con esta. Otra modificación que se realizó en el método de ensayo es la utilización de placa colaborante Steel Deck en vez del uso de restricciones que indica la norma.

La normativa de ensayo cuantifica entonces una relación de reducción de grietas (CCR), el cual se calculará como una relación entre el

ancho promedio de las grietas obtenidas en los paneles de concreto reforzado, con fibras y con malla, y en de los paneles de concreto de control (ASTM, 2013).

Esta investigación resulta de utilidad entonces a aquellos constructores que gusten utilizar el sistema de losa tipo deck con hormigón con fibras de acero, pues se tendrá un sustento técnico que les permitirá conocer y presentar a sus clientes el beneficio económico, técnico y constructivo frente al sistema utilizado convencionalmente para este fin. También servirá a académicos ecuatorianos, como punto de partida para nuevas investigaciones en el tema, pues durante el proceso de investigación, no se encontró ningún trabajo similar en el estado del arte del país.

MÉTODOS

Los materiales que se utilizaron para la investigación fueron: hormigón (compuesto a su vez de agregados, agua y cemento), varillas de acero (en forma de malla electrosoldada) y fibras de acero. Los fenómenos más importantes a tomar en cuenta para la presente investigación se detallan más adelante.

En cuanto al análisis técnico, se trata de una investigación experimental, para la cual se siguieron metodologías de ensayo ASTM para la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales utilizados (ASTM C136, C40, C131, C535, C29, C566, C127, C128, C403) y para el diseño de la mezcla de hormigón se utilizó el método ACI 211.1.

Para el análisis propiamente de la cantidad de fisuración o agrietamiento producido en los elementos de hormigón, se utilizó la metodología de ensayo ASTM C1579.

El análisis económico se lo realizó mediante una investigación de estudios de caso, utilizando el análisis de precios unitarios (APU) para determinar el costo total de una unidad de volumen en cada caso.

En el caso del análisis constructivo, la investigación fue netamente descriptiva, de manera que se manejó varios criterios bibliográficos que llevaron a conclusiones lógicas.

Hormigón

Fisuración del hormigón

Cuando el hormigón en estructuras presenta fisuras, puede ser síntoma de importantes fallas estructurales, falta de durabilidad o simplemente comprometer el aspecto de construcciones monolíticas, pudiendo provocar inseguridad en los usuarios de la edificación. Estas se pueden producir por numerosas causas, y su importancia dependerá principalmente del tipo de estructura y de su naturaleza, pues la fisura tiene el potencial de convertirse en fractura o inclusive grieta.

Las fisuras deben ser debidamente previstas y controladas antes de que presenten dichos problemas; caso contrario se deberá seguir un procedimiento de reparación (ACI Comité 244, 2001; ACI Comité 244, 2007).

Este fenómeno, según la bibliografía estudiada, se divide en fisuras del hormigón en estado plástico (o antes de endurecer) y fisuras de hormigón endurecido.

Tomando la idea de la clasificación de la Sociedad Técnica del Concreto, Reporte N°22, (1992) citada en Salgado (2010) y sintetizándola con la indicada por ACI Comité 244 (2007), se tiene la clasificación presentada a continuación (Figura 1).

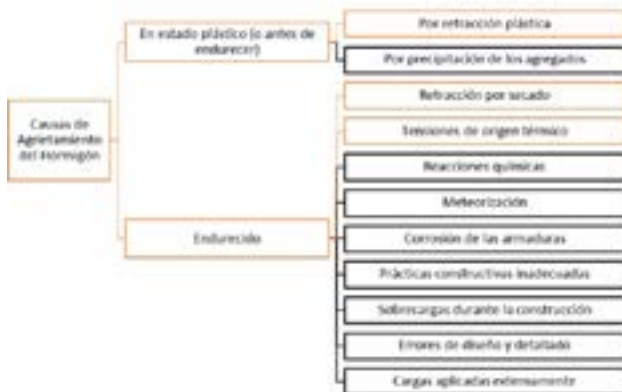


Figura 1. Causas de fisuración o agrietamiento del hormigón

Nota: se han resaltado las causas que tienen que ver con temperatura para la investigación presentada.

Como la investigación presente pretende estudiar la fisuración debido a la temperatura, humedad y viento, únicamente se tomará en cuenta a la retracción plástica, a la retracción por secado y a las tensiones de origen térmico como causantes de este.

Retracción plástica del hormigón

Aire (2011) resume el fenómeno de formación de fisuras por retracción plástica del concreto en una serie de pasos (Figura 2) enlistados a continuación:

1. Se presenta agua de exudación sobre el área superficial.
2. La velocidad de evaporación de agua es mayor a la del agua de exudación.
3. Se seca el área superficial del hormigón.
4. La lámina superficial seca intenta contraerse.
5. El hormigón inferior (aún húmedo y plástico) a la lámina superficial (ya seca) intenta resistir la contracción.
6. Se genera la reacción en el hormigón plástico.
7. Se genera agrietamiento por contracción plástica.

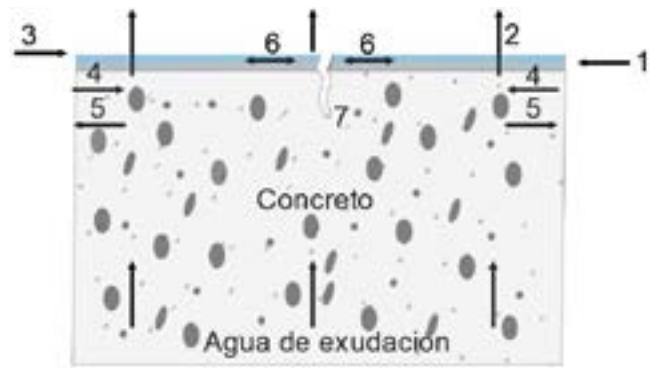


Figura 2. Formación de fisuras por retracción plástica (Aire, 2011)

Retracción por secado del hormigón

Se define a la retracción por secado a aquella deformación lineal, que depende del tiempo, a temperatura constante, que se produce en un elemento de concreto sin ser sometido a cargas que se deja secar.

Este cambio volumétrico producido es normal. Sin embargo, los elementos estructurales suelen estar restringidos por otro elemento estructural (el suelo o armaduras de acero empotradas), generándose fuerzas de tracción internas en el elemento.

Dichas fuerzas, al superar la baja resistencia a tracción del hormigón, generan agrietamiento en la superficie de éste (Figura 3). (ACI Comité 244, 2001; ACI Comité 244, 2007; Marino, 2009).

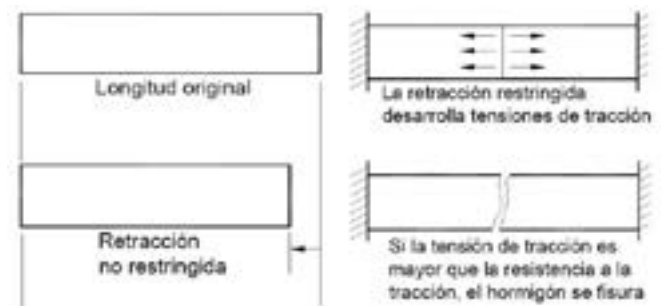


Figura 3. Agrietamiento por retracción por secado del hormigón (ACI Comité 244, 2001)

Tensiones de origen térmico en el hormigón

En este caso, las fisuras se producen debido a las diferencias de temperatura en las fibras existentes en el interior del elemento de hormigón las cuales “pueden ser provocadas por partes de la estructura que pierden calor de hidratación a diferentes velocidades, o por condiciones climáticas que enfrían o calientan una parte de la estructura hasta una mayor temperatura o con una mayor velocidad que otra” (ACI Comité 244, 2007).

Existen varias razones para que se presenten dichas gradientes de temperatura; entre ellas está que el núcleo del elemento de concreto se calienta más que las superficies de este debido al calor liberado durante la hidratación del cemento (proceso químico); la otra razón es que las superficies se enfrían más rápido que la parte central.

Este fenómeno provoca en el concreto algo similar a lo producido en la retracción por secado, es decir que se generen cambios diferenciales de volumen en el elemento, produciéndose fuerzas de tracción dentro

del mismo, las que, caso de superar la baja resistencia a tracción del hormigón producen fisuras en este (ACI Comité 244, 2007).

Control de fisuras en el hormigón

Existen una infinidad de metodologías para este fin, citadas por ACI Comité 244 (2007):

- Restablecer y aumentar la resistencia;
- Restablecer y aumentar la rigidez;
- Mejorar la funcionalidad;
- Lograr impermeabilidad;
- Mejorar la apariencia de la superficie de hormigón;
- Mejorar la durabilidad; y/o
- Impedir que se desarrolle un ambiente corrosivo en las armaduras.

Para fines de esta investigación se dará enfoque principalmente a la primera, la cual consiste en aumentar la baja resistencia a tracción del hormigón por medio del reforzamiento de este con acero, orientando todos los conceptos a sistemas de losas. La bibliografía en general llama a esta técnica refuerzo o acero de retracción y temperatura.

Para el caso de losas deck se utiliza este refuerzo en forma de mallas electrosoldadas, es decir varillas de acero fijadas entre sí. También se puede colocar el acero en forma de fibras pequeñas dispersas en toda la masa de la porción de hormigón de la losa con placa colaborante (Steel Deck).

-Requisitos para malla de acero electrosoldada (varillas de acero)

El área mínima de refuerzo para este fin, así como el espaciamiento máximo entre las varillas, su recubrimiento y su normativa ASTM a seguir son proporcionadas por ACI Comité 318 (2014) y ANSI/SDI (2017) (Tabla 1).

Tabla 1. Refuerzo de retracción y temperatura en losas

Tipo de Refuerzo	fy (MPa)	Cuantía Mínima de Refuerzo	Esp. Máx. (cm)	Recub. Min. (cm)	Nor-mativa ASTM
Varillas corrugadas	< 420	0.0020			A970M
Varillas corrugadas o malla de acero electrosoldada	≥ 420		5h < 45	2,0	A184M

fy= esfuerzo máximo a tensión del acero de refuerzo en MPa; h= altura de la losa en cm.

Tabla de elaboración propia basada en los requisitos presentados en ACI Comité 318 (2014)

Cuando se trata de sistema de losa con placa colaborante Steel Deck, los valores para malla de acero electrosoldada (Tabla 1) se ven complementados por los requisitos especificados en ANSI/SDI (2017): Se usará como refuerzo malla de acero electrosoldada o varillas de acero, para control y agrietamiento que no será usado para resistir esfuerzos de las cargas estructurales cuantificables, con un área mínima de 0.00075 veces el área de concreto sobre el deck (por pie o metro de ancho), pero no menos del área provista por la malla denominada 6x6-W1.4xW1.4 (152 x 152 mm-MW9xMW9) (ANSI/SDI, 2017).

En el mismo trabajo de la American National Standards Institute/ Steel Deck Institute (2017) se exponen las áreas para los distintos espaciamientos y tamaños de malla electrosoldada. Para la malla solicitada en el párrafo anterior, de 6x6-W1.4xW1.4 se establece un área de 0,028 $\frac{m^2}{ft^2}$ es decir aproximadamente 60 $\frac{cm^2}{ft^2}$.

Requisitos para fibras de acero

ANSI/SDI (2017), en su Normativa para Losas de Entrepiso Compuestas Steel Deck (C-2017) considera que se puede utilizar fibras de acero que cumplan con ASTM A820, tipo I, tipo II o tipo V, con una dosificación especificada por el fabricante de fibras pero no menor a 14.8 kg/m³.

Análisis técnico

Agregados

Para la elaboración del hormigón de las pruebas respectivas se utilizó agregado grueso con un tamaño máximo nominal (TMN) de 1" y agregado fino con módulo de finura de 3.2, ambos obtenidos de la cantera de Guayllabamba (Provincia de Pichincha, Ecuador) con las propiedades expuestas (Tabla 2).

Tabla 2. Propiedades de los agregados utilizados para la elaboración de hormigón

Materiales	Peso específico (Ton/m3)	% Humedad	% Absorción	Peso Unitario Compactado (kg/m3)	Peso Unitario Suelto (kg/m3)
Agua	1.000	-	-	-	-
Cemento	2.860	-	-	-	-
Grava	2.480	1.010	1.900	1380	1290
Arena	2.470	10.910	2.500	1650	1510

Cemento

El cemento que se utilizó para los ensayos de esta investigación fue Cemento Selvalegre Plus, cuyas características mecánicas, químicas y físicas son las detalladas a continuación, tomadas de la ficha técnica del fabricante:



Ficha Técnica Cemento Selva Alegre Plus

REQUISITOS QUÍMICOS		
PARÁMETRO	INEN 490	SELVALEGRE PLUS
Pérdida por calcinación	≤ 5%	1,4%
Magnesio (Mg%)	≤ 4%	2,3%
Sulfatos (SO ₃)	≤ 4,4%	2,4%

REQUISITOS FÍSICOS		
PARÁMETRO	INEN 490	SELVALEGRE PLUS
Fraguado inicial	≥ 45 + 438 min	140 min
Expansión	≤ 0,8%	0,24%
Contenido del aire	± 12%	4,50%

Ficha Técnica Cemento Selva Alegre Plus

Hormigón simple

Se elaboró un hormigón de 210 kg/cm² de resistencia a la compresión. La dosificación de la mezcla de hormigón se realizó siguiendo el método ACI 211.1 mediante hojas de cálculo Excel realizadas por Roger Laura Calle, auxiliar de docencia de tecnología del hormigón de la Universidad Mayor de San Andrés (Tabla 3).

Tabla 3. Dosificación final para 1m³ de hormigón simple

Material	Cantidades Secas				Cantidades Húmedas			
	Por Peso	Por Volumen	Por Peso	Por Volumen	Por Peso	Por Volumen	Por Peso	Por Volumen
Agua	209.641 Kg.	0.210 m ³	222.860 Kg.	0.223 m ³				
Cemento	451.812 Kg.	0.158 m ³	451.812 Kg.	0.158 m ³				
Grava	901.722 Kg.	0.364 m ³	912.092 Kg.	0.368 m ³				
Arena	733.669 Kg.	0.297 m ³	745.554 Kg.	0.302 m ³				
Aire	-	-0.028 m ³	-	-0.028 m ³				
TOTAL	2296.844 Kg.	1.000 m ³	2332.318 Kg.	1.022 m ³				

Los valores de la tabla fueron establecidos para 1m³ de hormigón.

Placa colaborante (Steel Deck)

Se utilizó la placa colaborante sismorresistente para losas “Kubilosa”, proporcionada por la empresa “KUBIEC-CONDUIT”.

La placa que ha de ser usada como restricción a la contracción del hormigón para la generación de fisuras, debe ser de alrededor de 1.2mm. También se especificó anteriormente que dicha placa sería reemplazada por una porción de Steel Deck. Con este antecedente se decidió trabajar con la placa de mayor espesor disponible, es decir la más cercana al valor especificado, que es la de 0.76mm de espesor.

Malla de acero electrosoldada

Se utilizó la malla de acero “Armex® Tradicional Tipo R con Apertura Cuadrada” proporcionada por la empresa “Ideal Alambrec-Bekaert®”. La cantidad de malla de acero a ser colocada se calculó tomando en cuenta todos los requisitos mínimos descritos anteriormente, lo cual se realizó utilizando la hoja de cálculo Excel (Figura 4).



Figura 4. Diseño de la malla de acero electrosoldada

Fibras de acero

Se utilizó la fibra de acero “Dramix® 3D 80/60BG” proporcionada por la empresa “Ideal Alambrec-Bekaert®”.

La ficha técnica del producto define una dosificación mínima de 10kg/m³, sin embargo, como se mencionó anteriormente, la dosificación mínima deberá ser de 14.8 kg/m³.

La dosificación seleccionada se calculó transformando la dosificación de malla de acero electrosoldada a peso por volumen (kg/m³), misma cantidad de acero en fibras.

El peso por metro cuadrado de la malla (W) y su límite de fluencia está detallado en su ficha técnica. El límite de fluencia de la fibra está detallado en su ficha técnica.

La transformación entonces se la efectuó dividiendo el peso W de la malla para el área efectiva de concreto y multiplicándola por un factor de transformación por diferencia de límites de fluencia entre la malla y la fibra como se expresa en la siguiente ecuación:

$$Dosif. fibra = \frac{W_{malla} \left(\frac{kg}{m^2}\right)}{A_c \left(\frac{m^2}{m}\right)} \times \left(\frac{f_{y_{malla}}}{f_{y_{fibra}}}\right)$$

El cálculo se realizó utilizando una hoja de cálculo Excel (Figura 5).

ACERO DE CONTRACCIÓN Y TEMPERATURA DECK	
FIBRA DE ACERO (DRAMIX 3D)	
W	2.50 kg/m ²
Tipo de Fibra	3D 80/60
f _y	12491.52 kg/cm ²
Dosif _{min}	11.18
Dosif _{max}	14.80
Dosif _{med}	15 kg/m ³
OK	
FIBRA DRAMIX SELECCIONADA	3D 80/60 Dosificación: 15kg/m ³

Figura 5. Diseño de la fibra de acero

Configuración de ensayos

Siguiendo los parámetros establecidos por ASTM C1579 y con la colaboración de la empresa de ingeniería mecánica IBIMCO, se realizaron los planos, fabricación y calibración de los equipos de ensayo para los ensayos pertinentes.

Los equipos utilizados fueron los moldes, ventilador, calefactor, deshumidificadores, cámara ambiental, sensores, plataforma de vibrado, equipo de acabado de superficie y recipiente de monitoreo especificados por dicha normativa.

Como ya se ha mencionado varias veces, las restricciones fueron reemplazadas por una porción de plancha Steel Deck con las características definidas anteriormente.

Para la medición de fisuras se utilizó un microscopio óptico, en cuyo software, Digital Microscope Suite 2.0, tiene incorporado cámara fotográfica y de video, y medidor de distancia con precisión de 0.01mm.

Muestreo y procedimiento de ensayos

Se realizó la mezcla de hormigón de acuerdo con la normativa de ensayo ASTM C192. En el caso del hormigón con fibras, se realizó el mismo procedimiento, añadiendo como último paso la colocación de las fibras a razón de 15kg/m³/15minutos.

Se elaboraron un total de 9 paneles, 3 de hormigón de control (PHC), 3 de hormigón con malla electrosoldada (HMES) y 3 de hormigón con fibras de acero (H15F). De cada panel se sacaron 3 cilindros para compresión simple y uno para tiempo de fraguado.

Se siguió exactamente el procedimiento establecido por la norma ASTM C1579:

- Se determinó el asentamiento de cada mezcla de acuerdo con ASTM C143.
- Se fabricó un espécimen para tiempo de fraguado del hormigón de acuerdo con ASTM C403 y se lo colocó en el flujo de aire para que esté expuesto a las mismas condiciones ambientales que los paneles de contracción plástica.
- Para el caso de hormigón de control y hormigón con fibras se llenó el molde del panel de prueba en una sola capa; para el hormigón con malla electrosoldada se colocó hormigón en el molde hasta cierta altura, se colocó la malla y se llenó el molde hasta el borde. En ambos casos se vibró como lo indica ASTM

C192. Se pasó la maestra de forma perpendicular a las crestas del Steel Deck 5 veces.

- Se realizó el acabado de la superficie con la paleta (llana) y bailejo.
- Se colocó el espécimen en la cámara ambiental bajo el flujo de aire y se encendió el ventilador; la evaluación de fisuración inició en este punto.
- Al inicio del ensayo y en intervalos de 30 minutos, se registró la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del flujo de aire a 100±5mm sobre la superficie del panel.
- Se ejecutaron ensayos de penetración cada media hora de acuerdo con ASTM C403. Se continuaron registrando las variables ambientales hasta el tiempo de fraguado final.
- Se pesó el recipiente de monitoreo al inicio del ensayo y en intervalos de 30 minutos.
- Después de que ocurrió el fraguado final, se registraron las variables atmosféricas y el tiempo y se apagó el ventilador; se determinó la pérdida total de agua en el recipiente de monitoreo. Se almacenó al panel en laboratorio a 23±2°C.

Cuantificación de fisuras

- Se midió el ancho superficial de las fisuras en los paneles a las 24 horas, 7 días y 28 días después del mezclado.
- Para prevenir posibles efectos de fisuras por bordes, se despreció fisuras hasta a 25mm desde el borde del panel.
- El ancho de cada fisura fue medido por medio de un microscopio óptico con 0.01mm de precisión cada 10±1 mm a lo largo de esta. Se repitió el proceso hasta que todas las fisuras fueron medidas. Se registraron todos los anchos de fisura para calcular el ancho promedio de fisura del panel.
- Se calculó la tasa de reducción de fisuras (CRR: crack reduction ratio) a las 24 horas, 7 días y 28 días con la ecuación:

$$CRR = \left[1 - \frac{\text{Promedio de anchos de fisura de la mezcla de hormigón reforzado con fibra}}{\text{Promedio de anchos de fisura de la mezcla de hormigón de control}} \right] \times 100\%$$

(ASTM, 2013)

Tiempo de fraguado

Como se indicó en los capítulos anteriores, con el objetivo de conocer cuándo retirar las probetas de ensayo de la cámara ambiental, se realizó el ensayo de tiempo de fraguado siguiendo la normativa de ensayo ASTM C403.

Análisis económico

Análisis de precios unitarios (APU) de losa deck con malla electrosoldada

El proceso estará enfocado principalmente a la instalación y construcción de la losa siguiendo aquel establecido por Sencico (s.f.) en su Manual Técnico Para el uso de Placas Colaborantes de Entrepiso (Acero-Deck).

Los rubros de este APU al igual que los precios actualizados de materiales y equipos se han definido considerando aquellos establecidos por varias entidades vigentes en el Ecuador como el Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha y la Cámara de la Industria de la Construcción.

Los salarios de la mano de obra fueron tomados del salario mínimo sectorial proporcionado por la Contraloría General del Estado Ecuatoriano. El costo de transporte para todos los casos se ha tomado como cero (0) debido a que depende de la ubicación de la obra.

Tomando en cuenta el proceso constructivo mencionado anteriormente, se han definido tres rubros para la construcción de un metro cuadrado de losa con placa colaborante con malla electrosoldada.

Placa colaborante Deck 0.76mm

Debido a que no se dispone de un rubro similar, se ha decidido elaborarlo basado en el rubro “Cubierta Estil Panel 0.30mm” de la revista Sigma, del Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha (2018), con ciertas modificaciones en los materiales; la mano de obra se mantiene, al igual que el equipo (la herramienta menor es el 5% de la mano de obra).

Este rubro incluye el corte y colocación de las placas, así como su perforación para fijarlas mediante 1 conector de corte soldado por cada metro cuadrado y la colocación del encofrado de las riostras laterales de la losa (Figura 6).

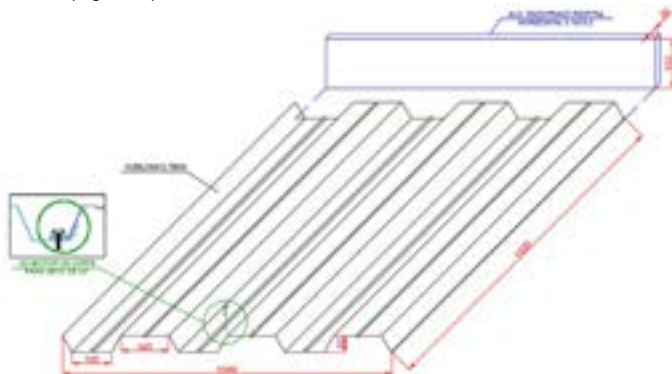


Figura 6. Rubro “Placa colaborante Deck 0.76mm.”

Malla Armex R-158 electrosoldada 15x15x5.5mm

El Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha (2018) presenta en su revista Sigma del mes de septiembre, el rubro “Malla Electrosoldada 15x15x3.5”, muy similar a la utilizada en esta investigación, por lo que solo se modificó el costo de la malla.

Este rubro incluye la colocación de dados (galleta) de mortero cemento-arena 1:5 de dimensiones 4x10x10cm (rubro auxiliar tomado de la misma revista), el corte y colocación de la malla electrosoldada sobre estos y su amarre con alambre recocido (Figura 7).

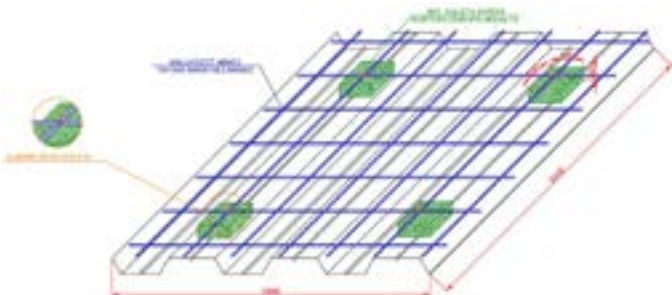


Figura 7. Rubro “Malla Armex R-158 electrosoldada 15x15x5.5mm.”

Hormigón simple en losa deck 7cm

El Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha (2018), en su revista Sigma (edición de septiembre), especifica el rubro “Hormigón simple losa superior $f_c=210 \text{ Kg/cm}^2$ ”, al mismo que no se le ha aplicado ninguna modificación. Este rubro incluye el vertido del hormigón sobre la placa colaborante y su vibrado (Figura 8).

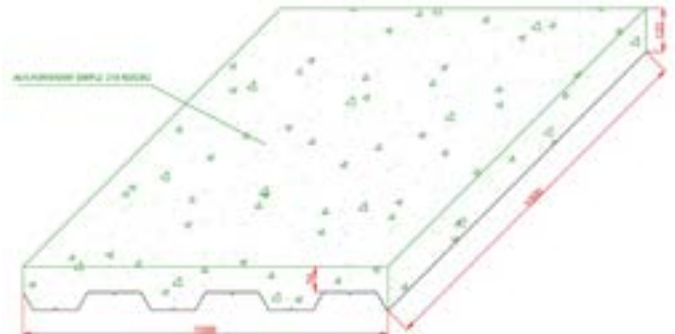


Figura 8. Rubro “Hormigón simple en losa deck 7cm.”

Análisis de precios unitarios (APU) de losa deck con fibras de acero El proceso estará enfocado en la misma perspectiva que el del caso anterior y fue tomado de la misma bibliografía. Sin embargo, al no colocarse malla electrosoldada y considerando fibras premezcladas en el hormigón, se han definido dos rubros.

Placa colaborante Deck 0.76mm

Este rubro es exactamente el mismo que el utilizado para la losa deck con malla electrosoldada (Figura 6).

Hormigón 210 con 15 fibra 80/60 en losa deck 7cm

El Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha (2018), en su revista Sigma (edición de septiembre), detalla el rubro “Hormigón simple losa superior $f_c=210 \text{ Kg/cm}^2$ ”, al mismo que se le ha agregado la dosis de 15kg/m3 de la fibra de acero utilizada para esta investigación.

Este rubro incluye el vertido del hormigón sobre la placa colaborante y su vibrado (Figura 9).

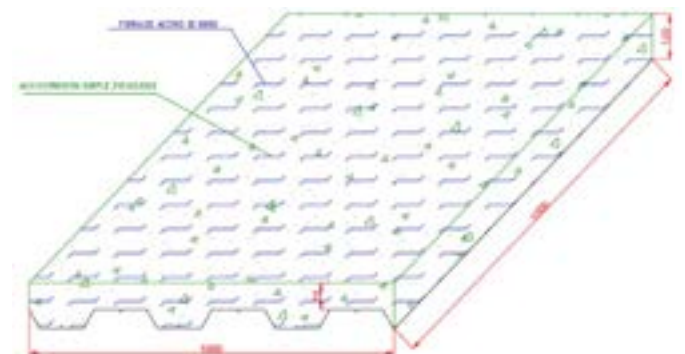


Figura 9. Rubro “Hormigón 210 con 15 fibra 80/60 en losa deck 7cm.”

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados del análisis técnico

Tiempo de fraguado

Las probetas fueron retiradas al cumplirse el tiempo de fraguado final, obteniéndose los resultados favorables (Figura 10).

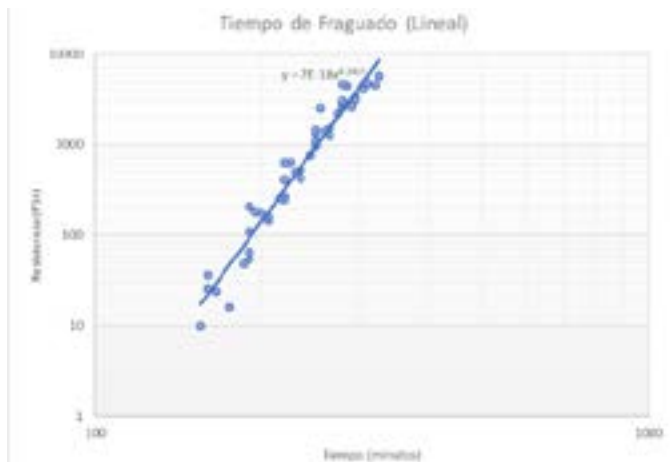
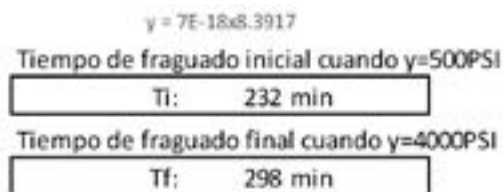


Figura 10. Tiempo de fraguado: Tiempo vs Resistencia a la penetración

Se observa una variación en los resultados de tiempo de fraguado por el método gráfico (curva) y por el método de regresión (lineal).

El programa de cálculo Excel no puede determinar los valores de forma gráfica, por lo que se ve obligado a determinar una ecuación, lo cual produce un error en los resultados; por lo tanto, se tomará como verdaderos a los resultados de la ecuación de regresión lineal.



El tiempo de fraguado inicial fue de 232 minutos (casi cuatro horas), mayor al de 140 minutos que se esperaba en este cemento (según su ficha técnica). Esto podría deberse a las condiciones de viento, humedad y temperatura de la cámara ambiental a las cuales fue sometido; el tiempo de fraguado final fue de 298 minutos.

Fisuración en el hormigón

Los resultados fueron obtenidos con la fórmula especificada para la tasa de reducción de fisuras (CRR) utilizando una hoja de cálculo Excel (Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6).

Tabla 4. Resultados de fisuración del hormigón de control (PHC)

Resumen de resultados de fisuración						
PHC: hormigón de control						
EDAD (DÍAS)	Ancho promedio (mm.)				Estadística	
	PHC1	PHC2	PHC3	PROM.	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (mm.)	% VARIACIÓN
1	0.20	0.20	0.13	0.20	0.0003	0.14%
7	0.24	0.23	0.13	0.24	0.0022	0.92%
28	0.22	0.21	0.12	0.21	0.0032	1.52%

Estadística PHC3*	
Desviación estándar (mm)	% Variación
0.0301	15.15%
0.0488	20.69%
0.0431	20.28%

*La prueba PHC3 presenta una variación demasiado alta por lo cual la desprecia.

Tabla 5. Resultados de fisuración del hormigón con malla electrosoldada (HMES)

Resumen de resultados de fisuración							
HMES: hormigón con malla electrosoldada							
EDAD (DÍAS)	Ancho promedio (mm.)				Estadística		CRR%
	HMES1	HMES2	HMES3	PROM.	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (mm.)	% VARIACIÓN	
1	0.14	0.14	0.15	0.14	0.007	4.62%	27.02
7	0.15	0.16	0.16	0.15	0.006	4.19%	34.48
28	0.13	0.14	0.13	0.13	0.003	2.37%	37.50

Tabla 6. Resultados de fisuración del hormigón con fibras de acero (H15F)

Resumen de resultados de fisuración							
HMES: hormigón con fibras de acero							
EDAD (DÍAS)	Ancho promedio (mm.)				Estadística		CRR%
	H15F1	H15F2	H15F3	PROM.	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (mm.)	% VARIACIÓN	
1	0.09	0.08	0.09	0.09	0.003	3.02%	56.02
7	0.10	0.09	0.10	0.10	0.004	3.63%	58.91
28	0.09	0.08	0.09	0.09	0.004	4.30%	58.30

También se presenta la comparativa de dichos resultados (Figura 11) en cuyo eje de las abscisas se representa la edad (en días) del hormigón y en el de las ordenadas se representa la fisuración obtenida.

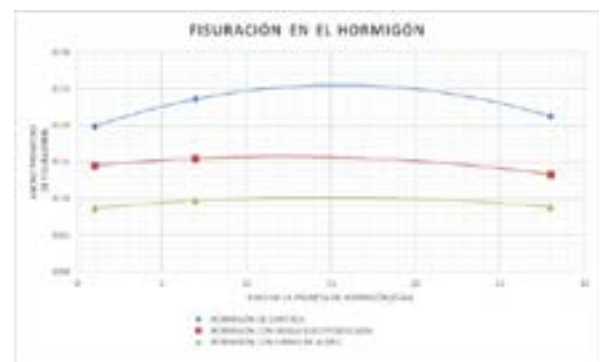


Figura 11. Fisuración del hormigón: Edad vs. Ancho de fisuras

El hormigón de la losa deck reforzado con malla electrosoldada redujo su fisuración en un rango del 27.02% (a las 24 horas) al 37.50% (a los 28 días), mientras que aquel que estuvo reforzado con fibras de acero redujo su fisuración en un rango del 56.02% (a las 24 horas) al 58.91% (a los 7 días), mejorando notablemente el desempeño del concreto ante este fenómeno.

Parámetros ambientales y tasa de evaporación

Los porcentajes de variación de los parámetros temperatura ambiental, humedad relativa, temperatura del hormigón y velocidad de viento son de 1.83%, 8.68%, 6.41% y 3.92% respectivamente; se aceptan estos porcentajes debido a que todos los datos se mantuvieron dentro de los rangos permitidos por la normativa de ensayo.

La tasa de evaporación promedio es de 1.13 kg/m²/h, cumpliendo el mínimo permitido por la prueba y su porcentaje de variación es del 4.58%, que está por debajo del 5% permitido por la normativa.

Resistencia a la compresión del hormigón

La resistencia a la compresión promedio de los ensayos resultó 283.88 kg/cm², mayor a la esperada de 210 kg/cm². Sin embargo, la variación entre las pruebas fue del 3.61%, valor muy cercano al establecido por la normativa de ensayo ASTM C39 de 2.4%, por lo cual prácticamente todas las probetas tienen la misma resistencia, es decir, que el fenómeno de fisuración no se vio afectado por la resistencia a la compresión del hormigón de las probetas.

Resultados del análisis económico

El análisis de precios unitarios en todos los casos, que incluye equipo, material y mano de obra se lo realizó en el software de ingeniería de costos Ares.

Losa deck con malla electrosoldada

En este caso, se observan tres rubros, con los siguientes resultados:

- Placa colaborante Deck 0.76mm (Tabla 7).
- Malla Armex R-158 electrosoldada 15x15x5.5mm (Tabla 8).
- Hormigón simple en losa deck 7cm (Tabla 9).

Tabla 7. Rubro “Placa colaborante Deck 0.76mm.”

Captura de pantalla tomada del programa ARES.

Tabla 8. Rubro “Malla Armex R-158 electrosoldada 15x15x5.5mm.”

Captura de pantalla tomada del programa ARES.

Tabla 9. Rubro “Hormigón simple en losa deck 7cm.”

Captura de pantalla tomada del programa ARES.

Costo total de losa deck con malla electrosoldada

Se han utilizado precios actualizados de los distintos materiales, equipos y mano de obra de construcción y se han usado rubros avalados por las distintas entidades con el fin de que los resultados se acerquen a la realidad. El presupuesto teórico resultante de construcción de losa deck reforzado con malla electrosoldada (Tabla 10) es de 129.94 USD/m².

Tabla 10. Presupuesto “Losa deck con malla electrosoldada”

DESCRIPCIÓN	UNL	CAN T.	PRECIO U.	PRECIO T.	MANO DE OBRA	MATERIALES	EQUIPO
CAPÍTULO GENERAL							
PLACA COLABORANTE DECK 0.76MM	M2	1.00	\$23.41	\$23.41	\$9.50	\$23.74	\$0.17
MALLA ARMEX R-158 ELECT.	M2	1.00	\$13.32	\$13.32	\$0.29	\$4.00	\$0.62
HORMIGÓN SIMPLE EN LOSA DECK 7CM	M2	1.00	\$81.01	\$81.01	\$71.41	\$8.18	\$0.22
				\$129.94	\$81.00	\$37.02	\$0.22

Captura de pantalla tomada del programa ARES.

Losa deck con fibra de acero

En este caso, se observan únicamente dos rubros, con los siguientes resultados:

- Placa colaborante Deck 0.76mm (Tabla 7)
- Hormigón 210 con 15 fibra 80/60 en losa deck 7cm (Tabla 10)

Tabla 11. Rubro "Hormigón 210 con 15 fibra 80/60 en losa deck 7cm."

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	PRECIO TOTAL	PRECIO UNIT. EQUIPO	PRECIO TOTAL EQUIPO
MATERIAL						
HORMIGÓN 210	M3	1.00	134.00	134.00	134.00	134.00
FIBRA DE ACERO 80/60	KG	15.00	3.40	51.00	3.40	51.00
MANO DE OBRA						
MATERIAL						
MANO DE OBRA						
TRANSPORTE						
PRECIO TOTAL						
PRECIO UNITARIO						

Captura de pantalla tomada del programa ARES.

Costo total de losa deck con fibra de acero

Tabla 12. Presupuesto "Losa deck con fibras de acero"

DESCRIPCIÓN	UNID.	CAN.	PRECIO UNIT.	PRECIO TOTAL	MANO DE OBRA	MATERIALES	EQUIPO
CAPÍTULO GENERAL							
PLACA COLABORANTE DECK 0.75M	M2	1.00	513.00	513.00	59.30	521.74	59.31
HORMIGÓN 210 CON FIBRA 80/60 EN LOSA DECK 7CM	M2	1.00	594.40	594.40	173.41	511.82	59.22
			5928.06	592.77	551.56	59.73	

Captura de pantalla tomada del programa ARES.

Se han utilizado precios actualizados de los distintos materiales, equipos y mano de obra de construcción y se han usado rubros avalados por las distintas entidades con el fin de que los resultados se acerquen a la realidad. El presupuesto teórico resultante de construcción de losa deck reforzado con fibras de acero (Tabla 12) es de 128.06 USD/m², lo cual representa un ahorro de 1.86 USD/m², es decir del 1.4% con respecto al caso anterior.

La variación del costo podría parecer mínima, pero si llevamos los números a grandes volúmenes de obra (como amplias losas de concreto en edificios con una cantidad considerable de pisos), el ahorro podría verse reflejado no solo en miles, sino hasta en millones de dólares.

Resultados del análisis constructivo

Al comparar el proceso constructivo de ambos casos, se observa que la losa deck reforzada con malla electrosoldada presenta 3 rubros, pues solo la colocación de malla representa un rubro. La losa reforzada con fibra de acero presenta únicamente 2 rubros debido a que la fibra se mezcla directamente en el hormigón como un agregado más.

La reducción de un rubro representa reducción y por ende ahorro en tiempo de construcción y ahorro de materiales, pues ya no se requiere ni los dados (galleta) de mortero ni el alambre para la fijación de la malla.

La colocación de la malla de acero implica bodegaje de dicho elemento, que deberá ser trasladado desde dicha bodega al lugar de trabajo y por ende se requiere de mayor personal, situación que no sucede en el caso de la fibra de acero el cual se comporta como un material más de la mezcla de hormigón.

La fibra de acero simplifica el proceso de instalación del acero para control de fisuras, hecho que disminuye el riesgo de accidentes en obra por tropezones o heridas por corte que podría provocar la malla de acero. La resistencia a la tracción mínima de la fibra de acero es de 1000Mpa

dos veces mayor a la de la malla electrosoldada de 500Mpa, lo cual permite utilizar menos acero para el mismo propósito, aliviando por ende a la estructura.

CONCLUSIONES

Una vez obtenidos y analizados todos los resultados de la comparativa técnica, económica y constructiva del sistema convencional de losa Steel Deck reforzada con malla de acero frente al sistema reforzado con fibra de acero, se concluye que:

- La hipótesis de la investigación que afirma que el uso de fibras de acero en el sistema de losas Steel Deck para control de agrietamiento provocado por contracción y temperatura del hormigón tiene un mayor beneficio tanto técnico-económico como constructivo frente al uso de la malla electrosoldada es correcta.
- El reemplazo de la malla electrosoldada del sistema convencional por fibras de acero tiene ventajas constructivas tanto en ahorro de tiempo como de materiales en la construcción, así como en facilidades de bodegaje del material y elimina su dificultad al momento de ser transportado.
- Una dosificación mínima de 12 kg/m³ de fibras de acero es suficiente para el control de fisuración por retracción plástica del hormigón en el medio local ecuatoriano.
- Ya sea por uno u otro método, es totalmente necesaria la utilización de un sistema de refuerzo para los esfuerzos producidos por la contracción y la dilatación del hormigón debido a la retracción plástica, pues la fisuración o agrietamiento es mucho mayor sin ninguno de estos sistemas.

Adicionalmente, es importante tener buenas condiciones de acabado de la superficie de la losa y de curado de esta para evitar la aparición y el crecimiento de dichas fisuras. También se puede disminuir el fenómeno de fisuración aumentando o disminuyendo ciertos parámetros de diseño.

Agradecimientos

Contribución de los autores: Constante y Cando participaron activamente en los procesos de conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, recursos, curación de datos, redacción, revisión y edición, visualización, adquisición de financiación. Ambos autores han leído y aceptado la versión publicada del documento.

Fuente de financiamiento: Esta investigación fue financiada por Sebastián Constante y Wilson Cando, investigadores activos del artículo. Asimismo, la "Pontificia Universidad Católica del Ecuador", quien redujo los costos de la elaboración de los ensayos para fines investigativos. La empresa "IBIMCO S.A." es la fabricante de la máquina de ensayo. La empresa "Ideal Alambrec-Bekaert", figura como proveedora de la fibra de acero, la malla electrosoldada y de datos técnicos necesarios para esta investigación. La empresa "Kubiec-Conduit", fue la proveedora de la placa colaborante (Steel Deck).

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. Los patrocinadores no tuvieron ningún papel en el diseño del estudio, recopilación, análisis o interpretación de datos, redacción del documento, o en la decisión de publicar los resultados.

REFERENCIAS

- ACI Comité 244. (2001). *Control de la fisuración en estructuras de hormigón (ACI 224R)*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ACI Comité 244. (2007). *Causas, evaluación y reparación de fisuras (ACI 224.1R-07)*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ACI Comité 318. (2014). *ACI 318S-14: Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario (ACI 318RS-14)*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Aire, C. (2011). Fisuras por contracción. *Construcción y Tecnología en Concreto*, 1(9), 26-29. <http://www.revistacyt.com.mx/images/portada/2011/pdf/DICIEMBRE.pdf>
- ANSI/SDI. (2017). *Standard for Composite Steel Floor Deck Slabs (SDI/ANSI C-2017)*. ANSI/SDI: American National Standards Institute/Steel Deck Institute.
- ANSI/SDI: American National Standards Institute/Steel Deck Institute. (2017). *C-2017 Standard for Composite Steel Floor Deck-Slabs*. ANSI: Approved American National Standard.
- ASTM. (2013). *Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert) (ASTM C1579-13)*. West Conshohcken: ASTM Internations.
- Cámara de la Industria de la Construcción Ecuatoriana. (2018). Los precios del mercado de la Cámara de la Construcción. *Construcción*, 52-53.
- Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha. (Septiembre de 2018). Listado de Rubros de Construcción. *SIGMA*, 39-58.
- Marino, P. (2009). *Contracción Por Secado Del Hormigón*. Buenos Aires: Centro de Investigaciones Viales.
- Salgado, S. (2010). *Estudio de losa sin junta de expansión: acceso sur*. Tramo Soterrado TS-8. (Trabajo de grado, Universidad de Santiago de Chile). http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-salgado_sz/pdfAmont/cf-salgado_sz.pdf
- Sencico. (s.f.). *Manual Técnico Para el uso de Placas Colaborantse Para Losas de Entrepiso Acero-Deck*. Lima.
- WRI: Wire Reinforcement Institute. (s.f.). *Manual of Standard Practice: Structural Welded Wire Reinforcement*. Wire Reinforcement Institute, Inc.