

MEMORIAS DE HORMIGONES ESPECIALES

Trabajos Finales de curso de Posgrado. Universidad de la República.
Posgrado en Construcción de Obras de Arquitectura.
Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, 2019.



Editoras: Dra. Arq. Gemma Rodríguez de Sensale, Esp. Arq. Viviana De Lima



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Facultad de Arquitectura
Diseño y Urbanismo
Udelar

MEMORIAS DE HORMIGONES ESPECIALES

Curso 2019

Editoras: Dra. Arq. Gemma Rodríguez de Sensale

Esp. Arq. Viviana De Lima

| hormigones especiales | temas generales |
| aspectos específicos | obras realizadas |

MEMORIAS DE HORMIGONES ESPECIALES
Curso 2019

Editoras: Gemma Rodríguez de Sensale y Viviana De Lima

Maquetación: Viviana De Lima

Fotografías de portada:

textura de arena: Viviana De Lima

textura de cemento portland: Iliana Rodríguez Viacava

textura de hormigón fresco: Madelón Iglesias

textura de pasto: Carlos A. Redondo

222 p.

Octubre de 2020

ISBN: 978-9974-0-1788-7

Trabajos Finales de curso de Posgrado Hormigones Especiales, Posgrado en Construcción de Obras de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República, 2019.

Índice

Prólogo.....V

Temas generales de hormigones especiales

Aproximación sobre el hormigón biológico.....1
Fernando França de Lima Sosa

Hormigón auto-reparante basado en el uso de bacterias que precipitan minerales.....19
Sofía Gambetta Rossi

Hormigón coloreado, un estado del arte.....31
Viviana De Lima

Hormigón autocurado: uso de agentes naturales o químicos.....45
Gerardo Nicolás Sosa López

Hormigones de secado rápido para pavimentos.....55
María Sabrina Sánchez Sarabia

Aspectos específicos de hormigones especiales

Comparativa hormigón convencional - hormigón autocompactante.
Aplicación a viviendas unifamiliares.....67
Lucía Emilia Cabrera Alcorta

HAD y HAC: incidencia en la reducción de indicadores de insustentabilidad
en obras de arquitectura.....81
Valeria Karina Esteves Garella

Controles que se realizan a los hormigones autocompactantes y sus
componentes en planta de producción.....89
María Elena Reolon Alvarez

Tres casos construidos en hormigón convencional y planteo de alternativas
con Hormigón de Alto Desempeño.....97
Inés Correa Rosales

Hormigón en masa, refuerzo con fibras sintéticas como alternativa a elementos
de acero.....105
Carla Carena Gordillo

Utilización de cenizas de biomasa en Materiales de Construcción.....119
Rodrigo Matías Giménez Acosta

Obras realizadas con hormigones especiales

Hormigón autocompactante. Obra: Aires del Norte, Lagomar.....	129
<i>Madelón Iglesias Gordillo</i>	
Utilización de hormigón autocompactante. Altamira centenario - edificio de viviendas.....	159
<i>Mariana Morales</i>	
Hormigones Autocompactantes : Cooperativa de viviendas por ayuda mutua Covisunmra.....	177
<i>Leandro Baptista</i>	
Hormigón Compactado por Rodillo: Explanada de Contenedores de la terminal Cuenca del Plata.....	191
<i>Marcelo Giacri</i>	
El gran Arco de la Défense: ¿Un desafío?.....	205
<i>Gabriel Pérez Miñón</i>	

PRÓLOGO

Como curso de actualización profesional en UdelaR se incluyó una asignatura denominada Hormigones Especiales, iniciada en el curso 1995, siendo Gemma Rodríguez responsable de la misma, convirtiéndose en pocos años en una asignatura de posgrado. Esa repetición exhaustiva, no supuso cierto cansancio, sino un enriquecimiento mediante la introducción de experiencias nacionales en la temática que pasaron a ocupar el lugar de las internacionales usadas como ejemplo en las versiones iniciales del curso.

El título de la misma responde a que en ella se estudia, por un lado, hormigones especiales y temas relativos a la ejecución de obras con ellos, haciéndose un mayor énfasis en aquellas que presentan mayor singularidad y, por otro lado, en los materiales que hacen posible esas obras. El planteamiento transversal que se señala, se refleja, tanto en el marco general que constituyen los hormigones especiales, como en el estudio de casos particulares donde se tienen que integrar conocimientos de diversas áreas.

El objetivo principal de la asignatura es transmitir al alumno conceptos y criterios para encarar una adecuada solución arquitectónica, empleando tanto técnicas avanzadas de construcción como materiales avanzados. Hay que pensar que el nivel de los requisitos exigidos a las mismas pueden ser muy variados y distintos a los usuales en obras convencionales. Asimismo, se pretende crear en el alumno una disposición abierta ante los cambios tecnológicos que representan. Con ello se pretende superar la inercia que con frecuencia con lleva el día a día de la práctica profesional.

En el planteamiento de la asignatura, no se pretende hacer especialistas en estos temas, sino dar criterio al alumno para el abordaje de ellos y que se enfrente con garantía de seguridad a dichos temas dentro de su vida profesional. El carácter de la misma es marcadamente tecnológico, pero con un planteamiento muy transversal de los temas, basados en los amplios conocimientos que el alumno debe poseer de las asignaturas, tanto de la especialidad más afines, como de otras especialidades, sin olvidar nunca que es un Arquitecto.

Dentro del método seguido en la asignatura se ha incorporado, aparte de las herramientas utilizadas usualmente en docencia, el estudio de casos. Asimismo se plantea una evaluación mediante trabajos finales. El desarrollo de esta asignatura a lo largo de los años ha tenido resultados muy satisfactorios, tanto para quien la imparte como para los alumnos que la cursan.

En el curso académico del año 2019, con el afán de mejorar el rendimiento de los trabajos y aportar valor añadido a los mismos, los temas que han sido propuestos por los estudiantes que han intervenido en la misma forman parte de este volumen y a ellos quiero agradecer su contribución y dedicación.

Aparte de la definición de los trabajos por parte de los estudiantes, también se preparó un formato de presentación tipo artículo o comunicación, limitando el número de páginas, el cual se aportó a los alumnos que han seguido dicho formato. Para la compaginación de los distintos trabajos y la puesta a punto de la edición se contó con la invaluable colaboración de la Arq. Viviana De Lima, sin la cual no hubiera sido posible su realización. El documento que ahora tienen en sus manos es el resultado de ese esfuerzo colectivo que, como el lector podrá comprobar, se entiende ha merecido la pena.

Dada la envergadura de la labor y el nivel alcanzado, con la esperanza de que el material generado sirva para las próximas ediciones del curso, se propuso el título de MEMORIAS DE HORMIGONES ESPECIALES (Curso 2019).

Este documento contiene trabajos que presentan temas generales y aspectos específicos de estos hormigones que contribuirán a captar la atención del alumno y actuarán como agente motivador para adquirir un mayor conocimiento sobre ellos integrando las obras realizadas con hormigones especiales. En paralelo hay trabajos que diferentes obras construidas con hormigones especiales, realizadas por los alumnos de la asignatura en el Posgrado de Construcción de Obras de Arquitectura de FADU-UdelaR así como en Educación Permanente. Con ello se pretende acercar al alumno a la temática y las obras ubicadas en su entorno más próximo potenciando un mayor conocimiento de las distintas infraestructuras que lo configuran; a su vez, generar un banco de datos relativo a este patrimonio construido que contribuya a un mayor conocimiento y divulgación del empleo de hormigones especiales en Uruguay.

Montevideo, Agosto de 2020

Gemma Rodríguez



Aproximación sobre el hormigón biológico

Fernando França de Lima Sosa¹

1. e-mail: fernandofranca1@gmail.com

Resumen: El presente trabajo tiene como objeto aproximarse al tema del hormigón biológico con el fin de aportar datos sobre el desarrollo de este material. Se considera que el desarrollo de este tipo de materiales bioreceptibles puede contribuir a una construcción más sostenible, que tenga como objetivo mejorar la calidad de vida de la personas, orientándose hacia una arquitectura sustentable. Es de interés aportar datos que surgen de la revisión bibliográfica producida en los últimos cinco años sobre las principales características de este nuevo material compuesto, su composición y comportamiento (que difieren con respecto a las de un hormigón convencional) así como sus posibles usos tanto en obra nueva como existente. Asimismo, resulta importante informar sobre los posibles beneficios medioambientales que puede presentar el hormigón biológico ya que, entre otras cosas, permite absorber y, por lo tanto, reducir el CO₂ de la atmósfera, gracias al recubrimiento biológico. Posee buena capacidad para captar la radiación solar y esto permite que presente un buen desempeño como material aislante y regulador térmico. Aparte de los beneficios antedichos, este material se nos presenta con un amplio potencial para uso arquitectónico al permitir generar superficies o fachadas con diferentes texturas, colores y acabados.

Palabras clave: hormigón biológico, eficiencia energética, hormigón arquitectónico,

Abstract: The aim of this paper is to approach the subject of biological concrete in order to provide information on the development of this material. It is considered that the development of this type of bioreceptible materials can contribute to a more sustainable construction, which aims to improve the quality of life of people, orienting towards a sustainable architecture. It is of interest to provide data that arise from the bibliographic review produced in the last five years on the main characteristics of this new composite material, its composition and behavior (which differs from those of a conventional concrete) as well as its possible uses in both new work as existing. Likewise, it is important to inform about the possible environmental benefits that biological concrete can present since, among other things, it allows to absorb and, therefore, reduce the CO₂ present in the atmosphere, due to the biological coating. It has good capacity to capture solar radiation and this allows it to present a good performance as an insulating material and thermal regulator. Apart from the afore mentioned benefits, this material presents us with a wide potential for architectural use by allowing to generate surfaces or facades with different textures, colors and finishes.

Key words: biological concrete, energetic efficiency, architectural concrete, bioreceptible materials, new materials.

1. Introducción

Se puede afirmar que al día de hoy la cuestión ambiental es una preocupación que ocupa a varios actores a nivel mundial, siendo reconocida como el gran problema de nuestros tiempos. En este sentido se ha alcanzado un cierto consenso sobre la importancia que reviste este tema, planteándose el desarrollo sustentable o sostenible como una respuesta para hacer frente a la crisis ambiental vigente.

Producto del gran crecimiento urbano que observamos en las ciudades que habitamos, vemos una gran expansión de la urbanización lo que viene provocando un abuso de los recursos finitos y del suelo. En este aspecto, Naciones Unidas indica que hacia el año 1950 “se estimaba que la población mundial era de 2.600 millones de personas. Se alcanzaron los 5.000 millones en 1987 y, en 1999, los 6.000 millones. En octubre de 2011, se estimaba que la población mundial era de 7.000 millones de personas. Para conmemorar este acontecimiento histórico, se puso en marcha un movimiento global llamado “Un mundo de 7 mil millones”. Por último, a mediados de 2015, la población mundial alcanzó los 7.300 millones de personas, lo que significa que, en 12 años, el número de persas en el mundo ha aumentado en 1.000 millones”. [1] “Fig.1”.



Esta situación de crecimiento conlleva como consecuencia directa, la modificación de los paisajes urbanos (McDonnell et al., 1997; Paul y Meyer, 2001; Manso, Sandra, 2014), amplificando el deterioro de los espacios verdes en las ciudades. Este acelerado desarrollo urbano es en gran medida responsable de las extinciones de áreas verdes y la pérdida de especies vegetales nativas, teniendo amplia influencia sobre el medio ambiente por encima de cualquier otra actividad humana (Checa et al. 2000 y McKinney 2002; Manso, Sandra, 2014). Las demandas de materiales de producción y para el consumo humano generan una alteración en el uso y la cobertura de la tierra, la biodiversidad y los hidrosistemas a todo nivel y escala (local, regional, mundial).

Según indica la Organización Mundial de la Salud (OMS) en conjunto con otras organizaciones, uno de los parámetros involucrados en la calidad de vida de la sociedad, es la superficie de áreas verdes por habitante (Priego, 2011; Manso.S., 2014)[2].

Este cambio en la demografía ha traído transformaciones del paisaje que tienen una serie de efectos documentados en los ecosistemas.

Afindeampliarinformaciónsobreelefectodeldesarrollo urbano en el funcionamiento de los ecosistemas se puede consultar literatura disponible [24-26].

Fig. 1 Población mundial proyectada por Naciones Unidas hasta 2100 - Fuente: Revisión de 2015 de la publicación World Population Prospect División de Población del Dpto. de asuntos económicos y sociales de las naciones Unidas

Ante esta situación de crecimiento urbano, y con el objetivo principal de minimizar los residuos y el desperdicio energético, se viene generando por parte de investigadores, un gran número de estudios y propuestas dirigidas a desarrollar nuevos materiales de construcción así como sistemas y técnicas innovadoras en términos de sostenibilidad medioambiental.

Entre la generación de nuevos materiales encontramos la búsqueda en la producción de hormigones más sostenibles.

1.1 La industria de la construcción

Dentro de las actividades humanas que se desarrollan y que poseen una influencia negativa sobre el medio ambiente encontramos a la industria de la construcción. Las construcciones son una importante fuente de contaminación pues son grandes consumidores de recursos naturales (combustibles fósiles, minerales, agua, madera, entre otros.).

Cuando hablamos de la construcción, nos referimos a todo el ciclo de vida ya que los edificios, una vez finalizados y puestos en servicio, continúan contaminando por el consumo de energía y agua que utilizan para su mantenimiento, elevando el ciclo hasta finalizar su vida útil. Incluso esta última etapa origina una gran cantidad de residuos que en su mayoría no son reciclables.

Se puede decir que esta industria es una de las actividades menos sostenibles del planeta y es por ello que se hace necesario un cambio a fin de disminuir el alto grado de recursos implicados en esta industria. [3]

Algunos datos al respecto:

- La industria de la construcción aporta al ambiente aproximadamente un 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- El proceso de extracción de materias primas así como los procesos industriales para la fabricación de materiales de construcción

causan daños como contaminación del aire con gases y partículas así como contaminación de agua y deforestación.

- Los edificios puestos en servicio consumen cerca del 70% de la energía eléctrica.

Si analizamos en particular el caso de un material compuesto con amplio uso en la construcción como lo es el hormigón, vemos que es un material que está compuesto básicamente por cemento, agregados, agua y aditivos.

La producción de los materiales que constituyen el hormigón convencional requiere la utilización de considerable energía y causa, además, grandes emisiones de CO₂.

Algunas de las estrategias para obtener un hormigón más sostenible son:

- Mejorar el proceso de producción del cemento (o clinker), evitando la vía húmeda en particular.

- Disminuir los recursos utilizados para su fabricación como por ejemplo buscar el reemplazo de parte del cemento Portland por materiales que son residuos provenientes de otras industrias (ceniza de cascara de arroz, cenizas volantes, humo de sílice, escorias de alto horno, etc.).

Estas estrategias que se viene implementando, tienen como objetivo reducir la emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂, producidos por el proceso de fabricación del cemento.

Al respecto de este tema, se pueden consultar datos nacionales en la bibliografía técnica disponible [30].

En la búsqueda de mejorar la situación ambiental comentada, disminuir la presencia de CO₂ en la atmosfera a fin de mejorar la calidad del aire de las ciudades, incorporar elementos verdes a los entornos urbanos mejorando la calidad de vida de quienes los habitan, y posibilitar la búsqueda de una estética a nivel de fachada, se han desarrollado investigaciones sobre un material

innovador para ser utilizado en la construcción como lo es el **hormigón de tipo biológico**, es decir un material a base de clinker que genere un sustrato biológico que permita o posibilite el crecimiento de microorganismos, en particular musgos y líquenes.

2. Espacios verdes urbanos

Una de las formas para mitigar alguno de los fenómenos indicados anteriormente y aumentar los espacios verdes en las ciudades es a través de su inclusión en las superficies de las estructuras de las edificaciones conformando fachadas verdes [3].

Además, desde el punto de vista de la calidad del aire, es beneficioso el uso de organismos simbióticos como musgos o líquenes en las fachadas. En especial, por las propiedades que los líquenes poseen, pueden ser considerados como un instrumento de detección del nivel de contaminación de las ciudades sirviendo para evaluar la tasa de contaminación atmosférica ya

que tienen la capacidad de absorber y almacenar sustancias presentes en la atmósfera. Asimismo, estos organismos son de ayuda para facilitar la descontaminación atmosférica ya que pueden absorber sustancias tóxicas como azufre, metales, hidrocarburos clorados y dióxido de carbono (entre otros).

Se ha demostrado que los líquenes poseen gran sensibilidad a muchos de los contaminantes presentes en la atmósfera por lo que se convierten en una herramienta útil y confiable a la hora de evaluar la contaminación aérea.

Más información sobre los líquenes y su beneficio a nivel medioambiental está disponible en la literatura [4 a 6].

2.1 Jardines verticales

Como se mencionó anteriormente, la presencia de elementos verdes naturales en las ciudades tiene efectos beneficiosos tanto a nivel social como

Tabla 1 Tipos de jardines verticales y soporte necesario (elaboración del autor).

Tipo	Sistema	Características generales de soporte
Fachadas verdes	Directo	La pared es el soporte y las plantas crecen directamente sobre esa. Las plantas crecen desde el suelo donde tienen sus raíces y toman de este la humedad y los nutrientes en su mayor parte
	Doble piel o indirectos continuo	Se necesita una única estructura de soporte como ser guías, cables o rejillas. Las plantas crecen desde el suelo donde tienen sus raíces y toman de este la humedad y los nutrientes en su mayor parte
	Doble piel o indirectos modular	Se necesita una estructura de soporte. Las plantas crecen en soportes modulares (bandejas o macetas)
Muros vivos	Sistemas continuos	Se necesita estructura de soporte. En este caso, pantallas permeables livianas donde se insertan las plantas individualmente
	Sistemas modulares	Se necesita estructura de soporte. En este caso, elementos de dimensiones específicas vinculados a estructura modular (bandejas, vasijas, bolsas flexibles, sembradoras)
Hormigón Biológico	Directo	La pared es el soporte y las plantas crecen directamente sobre esa y toman de ella y del ambiente, la humedad y los nutrientes.

ecológico y económico (Heidt and Neef, 2008[16]; Manso, Sandra, 2014 [2]).

Los beneficios que generan la presencia de espacios verdes naturales en las ciudades tanto a nivel ecológico como a nivel social (en referencia a la salud), es algo que ha sido estudiado y descrito por varios autores.

A la vez, el empleo de jardines verticales genera beneficios directos sobre la conservación de energía y brindan un entorno más formal y estético (Getter y Rowe, 2006; Manso, S, 2014) [2].

Más información sobre estos temas está disponible en la literatura [7 a 11].

Si bien, hoy en día se ha extendido por todo el mundo el interés en la generación de envolventes verdes sobre las construcciones, esto no representa una idea actual ya que su uso tiene antecedentes que se remontan a los míticos jardines colgantes de Babilonia (año 605 a.d.C.), pasando por la cultura Romana, el periodo gótico y el Renacimiento hasta llegar hasta nuestros días con ejemplos destacables. Más información sobre este tema está disponible en la literatura [12- 13].

A modo de información general, se podría decir que existen diferentes sistemas para la conformación de jardines verticales. Se podría, por ejemplo clasificar en función de la manera en que la vegetación se inserta en la envolvente del edificio. De la información bibliográfica relevada se elaboró

Imagen 1 - Sistema Continuo – Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo -Montevideo- Uruguay, (arriba).

Imagen 3 - Sistema Continuo – Vivienda unifamiliar, (abajo).

Imagen 2 - Sistema Continuo – Vivienda unifamiliar, (arriba).

Imagen 4 - Muro vivo –sistema modular – Edificio Celebra, Zonamérica Montevideo-Uruguay Proyecto de jardín vertical: Ignacio Solano, (abajo).





Imagen 5 -Muro vivo –sistema modular indirecto – Garage en altura - Montevideo- Uruguay



Imagen 6 (arriba) - Muro vivo - sistema modular – Edificio CaixaForum Madrid, España - Proyecto de jardín vertical: Patrick Blanc.



Imagen 7 (abajo) - Hormigón Biológico- Simulación de una fachada- Centro Cultural Aeronáutico del Prat de Llobregat. Fuente U.P.C

un cuadro que intenta generar una clasificación de las diferentes formas de conformación de un jardín vertical “Tabla 1”.

Algunos ejemplos

A modo de aporte sobre el tema, se muestran algunas imágenes con ejemplos nacionales e internacionales de fachadas o muros verdes en función de su forma de soporte. (Imágenes 1 a 7)

Se podría indicar que el hormigón biológico se presenta como una alternativa que al integrar la vegetación en la propia estructura del edificio sin

la necesidad de estructuras auxiliares, brinda la posibilidad de bajar los altos costos iniciales y de mantenimiento que presentan los demás sistemas de jardines verticales detallados así como daños potenciales hacia la estructura soporte.

3. Hormigón Biológico

Este nuevo material compuesto denominado hormigón biológico ha sido desarrollado y patentado [14] por los investigadores Sandra Manso, Ignacio Segura y Antonio Aguado del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC),

que trabajan en colaboración con el Laboratorio Magnel para la Investigación del Hormigón, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Gante (Bélgica).

Este proyecto ha sido premiado por innovador en el Beyond Building Barcelona- Construmat (BBB-CONSTRUMAT) -2015.

De forma general, podríamos decir que este hormigón biológico se propone obtener un mejoramiento de la bioreceptividad en materiales cuya componente principal es el cemento con el fin de facilitar el crecimiento biológico en una de sus capas.

En ese sentido, los estudios se han enmarcado en desarrollar un panel de hormigón de varias capas con mejoras [14-15]. Una de las capas de este sistema tiene la capacidad de brindar una superficie que permita el desarrollo de organismos de manera natural y acelerada, en especial musgos o líquenes que presentan ventajas ya comentadas al comienzo del ítem 2.

Más información sobre los líquenes y su beneficio a nivel medioambiental, está disponible en la literatura [4 a 6].

El material, que está pensado para ser utilizado en fachadas de edificios u otras construcciones en climas mediterráneos; presenta a la vez ventajas medioambientales, térmicas y estéticas respecto a otras soluciones de construcción similares. Es en este sentido es que se podría llegar a denominar a este tipo de hormigón como sostenible ya que se requiere menor consumo de energía, proporciona beneficios para las edificaciones, promueve mejoras en el entorno urbano y ayuda a reducir la contaminación ambiental.

3.1 Características generales

La inserción de este hormigón biológico como capa exterior de una edificación es el equivalente a crear una fachada verde que se comportaría como un muro vivo ya que las plantas crecen directamente sobre el soporte.

Como ya se vio, existen diferentes sistemas de conformación de muro verde en función de la

manera en que la vegetación se inserta en la envolvente del edificio.

En referencia al hormigón biológico para permitir y favorecer el crecimiento de vegetales sobre las fachadas se hace indispensable que:

- el sustrato (hormigón), tenga características químicas y físicas aptas a esa función.
- los organismos vegetales sean los idóneos a crecer en las condiciones ofrecidas por el hormigón.

Para lograr lo primero, el parámetro que hay que controlar es el potencial de hidrógeno (pH). Básicamente, el pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución que nos indica la concentración de iones de hidrógeno $[H]^+$ presentes en ella. El pH varía entre 0 y 14 y así una solución se define ácida si el pH es muy bajo (entre 0 y 4), neutra si el pH está entre 5 y 7, y alcalina si el pH es alto (entre 8 y 14).

El hormigón es un material alcalino y su pH inicial gira alrededor de 12-13 aunque este valor puede disminuir durante su vida útil. Para favorecer el crecimiento de las plantas se necesita un sustrato que no sea demasiado ácido ni demasiado alcalino, debiendo tener un pH con valores cercanos a 5-7.

De ahí que las investigaciones desarrolladas en los últimos años se han centrado en obtener diferentes composiciones y dosificaciones de cemento para bajar el pH del hormigón pues se requieren modificaciones en la bioreceptividad primaria del hormigón que será usado como sustrato para que facilite el crecimiento biológico [15].

La bioreceptividad primaria, fue definida por Guillitte [17] como “la totalidad de las propiedades materiales que contribuyen al establecimiento, anclaje y desarrollo de la flora y / o fauna” (Manso, S et al., 2014) [15].

Según se indica, una de las propiedades más importantes de la bioreceptividad primaria de un sustrato es el pH y, en consecuencia, la

composición química y mineral (Wilimzig y Bock, 1996; Warscheid y Braams, 2000). En segundo lugar, propiedades tales como la porosidad y la rugosidad también definirán la naturaleza de la colonización debido a la retención de materia orgánica, polvo y gotas de lluvia y la provisión de puntos de anclaje para los microorganismos (Guillitte y Dreesen, 1995; Silva et al., 1997). Sin embargo, hay otros parámetros que afectan la bioreceptividad de un sustrato (higroscopicidad, color del material, porcentaje de radiación que refleja la superficie respecto a la radiación que incide sobre ella, etc.) (Guillitte, 1995; Manso, S et al., 2014) [15].

3.2 Composición del panel de hormigón

Los estudios que se han llevado adelante por Manso y el equipo de la UPC se basan en el desarrollo de un panel de hormigón de varias capas donde se mejora la bioreceptividad de una de ellas (de base cementicia) para permitir el crecimiento biológico [14].

De manera general, el sistema patentado se compone de cuatro capas "Fig. 2" - [14].

La **primera capa** consiste en hormigón convencional y es responsable de la función estructural del panel. La producción de esta capa dependería de los requisitos del proyecto.

La **segunda capa** cumpliría la función principal de proteger y evitar el deterioro de la primera. Esta capa tiene una capacidad impermeable y también podría mejorar la adhesión entre la primera y la tercera capa.

La **tercera capa** (capa biológica), es la que presenta la propiedad de bioreceptividad mejorada y es la capa que motiva los estudios e investigaciones que se vienen llevando adelante por este equipo de investigadores. La mejora de la bioreceptividad permitiría también la retención de agua de lluvia, la retención de polvo y la estimulación de la colonización por parte de los organismos vivos.

Esta capa bioreceptiva generaría un soporte biológico natural para el crecimiento y desarrollo de determinados organismos biológicos; concretamente ciertas familias de micro algas, hongos, líquenes y musgos (ya se ha comentado y sugerido bibliografía ampliatoria sobre los beneficios de estos organismos vivos).

Si bien, generalmente se considera como algo patológico la presencia o crecimiento biológico sobre las superficies de un hormigón debido al biodeterioro que se puede generar, hay estudios que indican que ese crecimiento cumple una función protectora, dependiendo del tipo de plantas. [15]

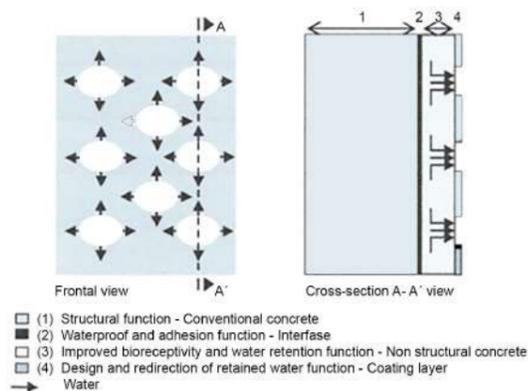


Fig. 2 Dibujo esquemático del panel propuesto [14].

Extraído de [18]

Se prevé que la modificación física y química de la bioreceptividad primaria abra nuevas posibilidades. En primera instancia, las alteraciones químicas para reducir el pH permitirán que una mayor variedad de organismos colonicen la superficie. Posteriormente, los cambios físicos también proporcionarán condiciones óptimas para la colonización (Manso, S et al., 2014) [15].

La **cuarta y última capa** se propone como una capa de revestimiento discontinua con el fin de permitir diferentes diseños de la superficie. Las áreas sin esta capa pueden retener agua, lo que permite que los organismos colonicen la superficie. Luego, la salida de agua se redirige a estas áreas para promover mejores condiciones locales para los organismos colonizadores. Esta capa funcionaría de impermeabilización inversa ya que permitirá, en general, la entrada del agua de lluvia y evitará su pérdida; de modo tal que se redirigirá la salida del agua en donde interese obtener el crecimiento biológico.

3.3 Propósitos generales de las investigaciones realizadas

En general, los propósitos de las investigaciones llevadas adelante en conjunto por el equipo de la Universidad Politécnica de Cataluña en conjunto con el Magnel Laboratory for Concrete Research de la Universidad de Gante (Bélgica), han sido el seleccionar una composición concreta de este hormigón que sea la más adecuada para funcionar como un elemento no estructural del panel multicapa, buscando la bioreceptividad de mezclas de hormigón con diferente rugosidad y porosidad.

Los investigadores crearon este nuevo tipo de hormigón biológico a partir de dos materiales basados en cemento. El primero de ellos es en base al cemento portland ordinario (OPC), con el cual se busca obtener (mediante la incorporación de adiciones ácidas), un hormigón carbonatado con un pH en el rango de 5- 8.

El segundo material está fabricado con un cemento de fosfato de magnesio MPC (Magnesium-Phosphate Cement, por sus siglas en inglés),

conglomerante hidráulico que no requiere ningún tratamiento para reducir el pH, puesto que éste es ligeramente ácido.

4. Metodología de investigación y algunos resultados obtenidos

Dada la amplia bibliografía existente, es interés de este trabajo presentar las generalidades de la investigación y algunos de los resultados de lo realizado por el equipo desarrollador del Hormigón Biológico de la Universidad Politécnica de Cataluña (España) en conjunto con el Magnel Laboratory for Concrete Research de la Universidad de Gante (Bélgica).

Como ya se comentó, la investigación partió de una idea que apuntaba al desarrollo de un panel de hormigón confeccionado por múltiples capas apuntando a la mejorar de la bioreceptividad en una de ellas con el fin de permitir el crecimiento biológico.

Para ello, el equipo investigó la mejor manera de favorecer el crecimiento de cierto tipo de organismos en el hormigón, buscando conseguir acelerar el proceso natural de colonización a fin de lograr un aspecto atractivo en no más de un año. [18].

La búsqueda era desarrollar un material de base cementicia de bajo pH a fin de para aumentar la bioreceptividad. Las modificaciones de la bioreceptividad primaria de los materiales de cemento podrían ser interesantes para estimular la colonización natural de hongos, líquenes y musgos de forma natural y acelerada.

Ciertas propiedades como la porosidad, el tamaño de la porosidad abierta, la rugosidad, la composición química y el pH son consideradas fundamentales pues afectan la bioreceptividad primaria en materiales inertes. Esas propiedades son posibles de ajustar a través de la dosificación (propiedades físicas) o por la naturaleza del aglutinante hidráulico que se use (pH y composición química).

Las condiciones ideales para el crecimiento y desarrollo biológico requieren de un sustrato con



Imágenes 8, 9 y 10. Fuente: el autor.

pH en un rango óptimo de entre 5 a 8. Podemos decir que un hormigón con ese valor de pH es un hormigón que se encuentra carbonatado lo que propicia (junto a otras condicionantes como la heterogeneidad del material) el crecimiento y proliferación de plantas.

Ese bajo pH y la heterogeneidad del material, proporciona un sustrato ideal para la colonización de plantas y cianobacterias que en general destacan por su color negro, siendo un crecimiento no deseado y desagradable a la vista. Es posible ver esto último en estructuras de hormigón u

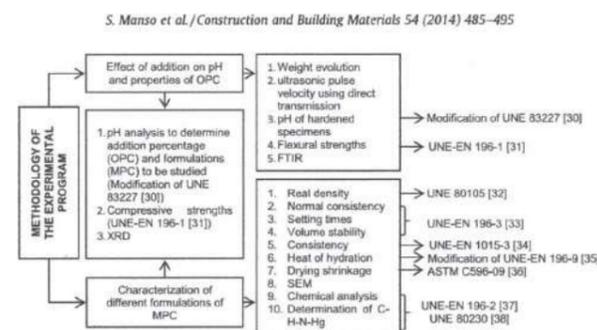


Figura 3. Esquema de la metodología del programa experimental. Extraído de [18].

otros materiales que se encuentra en estado de abandono o con bajo mantenimiento (Imágenes 8, 9 y 10).

Para obtener un material de base cementicia con pH bajo, los investigadores trabajaron sobre dos formas diferentes de obtener esa característica desarrollando una metodología que se puede ver en la “Fig. 3”.

La metodología considera también llevar adelante la evaluación del efecto de podrían tener las adiciones ácidas en las propiedades de un OPC. Por otro lado, se buscó la caracterización completa de diferentes formulaciones o relaciones de MPC. Si bien el pH del MPC es adecuado a la necesidad y uso buscada, los investigadores tuvieron la necesidad de evaluar la idoneidad de esas relaciones como material aglutinante.

La primer forma manejada fue la de reducir el pH de un hormigón convencional utilizando un cemento portland convencional (OPC) (Ordinary Portland Cement) más la incorporación de adiciones ácidas con lo cual se obtendría un material de un pH en el entorno de 8. Se investigó la adición de compuestos ácidos como el ácido bórico (H_3BO_3) y ácido oxálico ($(COOH)_2 \cdot 2H_2O$) - como el ácido débil y el ácido fuerte respectivamente- para la fabricación de muestras de OPC.

En ese sentido, se emplearon dos metodologías de adición diferentes: diluir de forma previa la adición en el agua de mezcla y sin dilución previa. Las concentraciones de ácido bórico estuvieron en el rango de 0 a 8%, mientras que las concentraciones de ácido oxálico estuvieron entre 0% y 13% para luego comparar resultados (Manso et al., 2014) [18].

Según se indica en la bibliografía técnica, básicamente, el ácido bórico actúa como un retardador, llegando a detener el proceso de hidratación cuando las concentraciones son mayores al 2% (Manso et al., 2014) [22].

El ácido oxálico juega un papel como reductor hídrico. Concentraciones mayores del 0,1% aceleran la hidratación del aluminato y retrasan

la hidratación de los silicatos (Manso et al., 2014) [23].

La segunda forma de trabajo se orientó en evaluar la idoneidad de otro aglomerante hidráulico con pH más bajo para lo cual se manejó el uso de cemento de fosfato de magnesio MPC, conglomerante hidráulico que no requiere ningún tratamiento para reducir el pH, puesto que este es ligeramente ácido. Estos materiales de cemento se producen principalmente como una mezcla de óxido de magnesio y una fuente de fosfato.

En ese sentido se utilizaron tres compuestos para producir muestras de MPC. En la investigación desarrollada por el equipo de la UPC en conjunto con el equipo de la Universidad de Gante, se utilizó óxido de magnesio con baja reactividad (MgO), dihidrógeno fosfato de amonio (ADP , $NH_4H_2PO_4$) y bórax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), como un retardador [18].

El OPC es el aglomerante hidráulico más popular en la construcción. Los materiales de construcción hechos de OPC tienen un pH inicial entre 12 y 13, (que puede disminuir durante su vida útil). Sin embargo, otros aglutinantes hidráulicos como los cementos ácido-base podrían ser una alternativa para este propósito.

Los cementos ácido-base son, básicamente, materiales formados por una reacción entre un ácido (generalmente en fase líquida) y una base (generalmente en polvo) y por reacciones de hidratación. Estos cementos son todos caracterizados por tener un pH bajo sobre todo durante la fase de fraguado y por ser biocompatibles. Por esta última razón, son utilizados para aplicaciones dentales.

Solo a modo de información, dejamos planteado algunos de estos tipos de cementos que han sido estudiados (además de los citados anteriormente):

- Cemento de fosfato de cinc
- Cemento de policarboxilato
- Cementos de ionómeros de vidrio

Existen algunas investigaciones donde se indica el uso de posos de café con objeto de disminuir el pH. En este aspecto el café se ha mostrado eficaz, y además se ha comprobado en el tiempo que, como toda la materia orgánica, es una válida alternativa para acidificar los suelos. En particular, en una perspectiva de desarrollo sostenible, se podrían utilizar para conseguir este objetivo. Los posos de café (desechos del café) han sido utilizados en la investigación de Teck-Ang Kua (2017) [28], para la realización de geopolímeros, o sea polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización que les confieren un elevado potencial para ser usados como sustitutos de cementos portland [29].

Como antecedente, el MPC se ha utilizado con anterioridad en la construcción como material de reparación por su propiedad de rápido fraguado. También ha sido empleado como biocemento en el ámbito de la medicina y la odontología [18 a 21].

Posteriormente, para el cemento de fosfato de magnesio, también se probaron diferentes proporciones de $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$: MgO (relaciones P:M)* con y sin adición de una cantidad fija de bórax (6% p / p). Las relaciones P: M seleccionadas se probaron física y mecánicamente para compararlas con el cemento ordinario Portland (OPC) hecho de CEM I 52.5R.

*Relación P:M = Relación $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$: MgO

P: Di hidrógeno Fosfato de Amonio o Fosfato Diamónico (DAP).

M: Óxido de Magnesio (MgO) con baja reactividad.

El uso principal del **DAP** es el de fertilizante. Cuando se aplica como nutriente de las plantas, aumenta temporalmente el pH del suelo, pero a lo largo del tiempo el suelo tratado se vuelve más ácido que antes debido a la nitrificación del amonio. Es incompatible con productos químicos alcalinos: porque su ion amonio se convierte en amoniaco en un entorno de pH alto.

El **MgO** es uno de los parámetros de calidad en la fabricación del cemento Portland en plantas de proceso seco. Si se agrega demasiado MgO, el cemento puede llegar a ser expansivo.

En referencia a trabajar en la estructura física del nuevo material, se tuvo como objetivo, producir muestras de OPC y MPC con diferente porosidad y rugosidad, para lo cual se utilizaron dos tamaños diferentes de agregados de sílice (0/2 mm y 2/4 mm).

Las proporciones de agua a cemento oscilaron entre 0,3 y 0,6 y entre 0,15 y 0,28 para especímenes de OPC y MPC, respectivamente, según la Norma española para OPC (UNE-EN 196-1: 2005, 2005) [18].

4.1 Algunas conclusiones de las investigaciones realizadas por el equipo de la UPC y la U.G. [15 y 18]

Se llevaron a cabo ensayos para disminuir el pH de OPC y la caracterización de MPC para evaluar su idoneidad para aplicaciones de construcción e industriales [18].

Referente al uso de ácidos en OPC para disminuir el pH [18]:

- Las concentraciones inferiores al 2% de ácido bórico ralentizaron el ajuste y también afectaron significativamente las propiedades físico-químicas del mortero OPC, aunque su pH todavía es demasiado alcalino. Por otro lado, el ácido oxálico presentó un comportamiento totalmente diferente, sin mostrar ningún daño significativo ni disminución del pH.

- De acuerdo con los resultados y el análisis de los ensayos para reducir el pH del mortero de OPC, se descartó el uso de OPC con adiciones de ácido.

- El pH final, que no fue lo suficientemente bajo como para que el material se utilizara como soporte biológico y el impacto negativo en las propiedades de las muestras, en su mayoría propiedades mecánicas, fueron las razones principales del rechazo.

- Muestras con adiciones de ácido bórico al 4% o más mostraron una disminución importante de la resistencia a la compresión como consecuencia de la detención del proceso de hidratación. Por otro lado, las adiciones inferiores al 2,5% inducen una desaceleración del proceso de hidratación debido a la precipitación de diborato de calcio.

- Las muestras con adición de ácido oxálico mostraron un aumento de las resistencias a la compresión hasta 28 días, independientemente de la cantidad de adición. Sin embargo, los valores relativos de resistencia a la compresión disminuyeron a medida que aumentaba la adición de ácido oxálico.

- Los ácidos utilizados actúan de forma diferente sobre el OPC. El ácido bórico actúa como un retardador del endurecimiento, llegando a detener el proceso con adiciones de hasta el 2%. No obstante, el ácido oxálico parece producir el efecto opuesto, actuando también como un reductor de agua con el consiguiente impacto en la trabajabilidad.

Respecto al retardo que produce el ácido bórico en la hidratación, se puede ampliar en [22]

Referente a la caracterización del MPC [18]:

- Se notaron diferentes propiedades interesantes de este material. Primero, el rango de pH es aceptable de acuerdo con lo buscado (5.8 y 7) y, comparativamente con el OPC (CEM I 52.5R), el MPC requiere menores cantidades de agua para la hidratación. En consecuencia, este hecho es positivo para reducir las cantidades de agua en la producción industrial. Sin embargo, se observó una demanda de agua ligeramente mayor para las relaciones P: M más bajas que para las más altas. Por lo tanto, se obtuvieron tiempos de fraguado bajos, siendo aún más bajos para relaciones P: M más bajas.

- Las formulaciones con relaciones P: M más bajas fueron las más interesantes, principalmente por razones económicas, así como para una mejor trabajabilidad, por lo que se seleccionó

una relación agua/cemento, para obtener una consistencia similar a la de OPC.

En consecuencia, se obtuvieron mejores resultados en todas las pruebas de caracterización para formulaciones con relaciones P: M más bajas. Además, el análisis químico dio una idea de los diferentes compuestos presentes en la muestra, incluido el porcentaje y los productos cristalinos después del proceso de hidratación. No se observó la presencia de compuestos peligrosos para la salud humana (durante la producción) o la durabilidad estructural.

En resumen, para producir un material de base cementicia de bajo pH en cumplimiento de los requisitos de uso, el mortero MPC es el aglutinante más adecuado. Su pH está más cerca de la neutralidad independientemente de la relación P:M dentro del rango investigado. Además, es importante señalar que las relaciones P: M más bajas son más interesantes debido a las mejores propiedades físico-mecánicas, así como desde un punto de vista económico.

Referente a los resultados del estudio del MPC [15]:

- Las muestras de MPC mostraron una mayor bioreceptividad para *Chlorella Vulgaris* que las muestras de OPC. Esto puede ser una consecuencia del pH y la composición química que hace que este aglomerante hidráulico sea adecuado para permitir el crecimiento de microorganismos.

- El MPC es más adecuado para la estimulación de la colonización de algas si bien otros grupos de organismos pueden tener mayor afinidad por la OPC carbonatada.

No obstante, dado que las algas son pioneras en la bioincrustación de materiales de base cementicia junto con las bacterias, es probable que el mortero MPC se colonice rápidamente.

Las propiedades químicas de estos especímenes (*Chlorella Vulgaris*) parecen tener más influencia en la colonización que las propiedades físicas. Este hecho se puede ver cuando se comparan muestras de OPC y MPC.

Además, la diferencia más clara entre los diferentes especímenes de CPM para la colonización por *Chlorella vulgaris* es la heterogeneidad del crecimiento inicial. Debido al mayor diámetro de poros, el agua que contiene las algas ha entrado en los especímenes, mostrando un patrón de incrustamiento más heterogéneo.

Las muestras de MPC con menor rugosidad mostraron resultados similares, aunque las inspecciones visuales mostraron un crecimiento más homogéneo y resistente y una mejor estética.

- Las inspecciones visuales revelaron una diferencia en la primera etapa de colonización entre especímenes OPC y MPC. Para las muestras de OPC, la bioincrustación comenzó en el lado inferior de las muestras, lo que puede estar relacionado con la alta cantidad de humedad localizada en esta área. En contraste, las muestras de MPC mostraron una mejor retención de agua, así como una distribución de humedad más homogénea. En consecuencia, las muestras de mortero MPC se comportan como un filtro donde el agua penetra y las algas permanecen en la superficie, localizando inicialmente la formación de algas en la parte superior.

- En relación con el inicio de la bioincrustación, la presencia de algas se detectó desde la primera semana en la superficie de las muestras de MPC y desde la segunda semana en las de OPC. Además, las muestras de MPC se ensuciaron completamente después de 4 semanas, mientras que no se observó una completa incrustación hasta las 20 semanas para las muestras de OPC

Información más precisa sobre dosificaciones técnicas y resultados de la caracterización química y mecánica de las muestras estudiadas se pueden ampliar en [15 y 18].

Nos parece oportuno indicar que existen otros estudios e investigaciones sobre este tema desarrollados tanto por el equipo de la U.P.C en conjunto con la Universidad de Gante como por parte de otros investigadores

5. Fortalezas y oportunidades

Del estudio de la bibliografía consultada, en especial la generada por los desarrolladores de este nuevo material, es de interés dejar algunas consideraciones sobre el hormigón biológico:

- Es una tecnología que a priori se presenta con altas prestaciones en varios niveles y se enmarca dentro de la línea del desarrollo sostenible. El nuevo material, ofrece aplicaciones y ventajas diversas de tipo medioambiental, térmico y estético.

- Si lo vemos desde el punto de vista de consumo energético y huella ecológica, el cemento Portland convencional (OPC), es el aglomerante hidráulico más utilizado en la industria de la construcción, y, en correcto uso, presenta un buen desempeño en términos de durabilidad y capacidad de almacenamiento de calor pero su producción implica desventajas ambientales relacionadas con el alto consumo de energía embutida y las emisiones de CO₂. (La producción de aproximadamente 1 kg de CO₂ por kg de OPC da como resultado un 6-7% de las emisiones anuales de CO₂ a nivel mundial) (Manso, S et al., 2014, Formosa, 2012).

El uso de cementos de fosfato de magnesio (MPC) se presenta como otra alternativa en la búsqueda de elaborar un hormigón más sostenible.

Según la bibliografía técnica disponible, con respecto al consumo de energía, se ha estudiado que se necesitan 4 GJ de energía para fabricar 1 tonelada de cemento Portland (Malhotra, 1999; Mehta, 1999). Sin embargo, el óxido de magnesio (que es la materia prima de los cementos de fosfato de magnesio) se obtiene fácilmente calcinando la magnesita. Este proceso de descomposición ocurre a temperaturas alrededor de 400 ° C, que es mucho más baja que la temperatura requerida para descomponer la piedra caliza y para formar alita en la producción de clinker de Portland. (Manso, S., 2014) [18].

- La producción de materiales de base cementicia que estimulan la colonización natural mejoraría los diseños actuales de los jardines verticales. Esto no solo tendría a favor una ventaja estética,

sino que también traería aparejado beneficios ecológicos y ambientales. Como se mencionó en este trabajo, los sistemas de jardines verticales o muros vivos presentan ventajas debido a la presencia de organismos biológicos que utilizan como energía el CO₂ y la energía de la luz solar para la fotosíntesis. A la vez, tienen la capacidad para captar la radiación solar, lo que permite regular la conductividad térmica en el interior de los edificios en función de la temperatura lograda.

- El hormigón biológico se presenta como una alternativa a los sistemas de jardines verdes convencionales ya que al integrar la vegetación en la propia estructura del edificio sin la necesidad de estructuras auxiliares, brinda la posibilidad de bajar los altos costos iniciales y de mantenimiento que presentan los demás sistemas de jardines. Las fachadas vegetadas y los jardines verticales se basan en la utilización de un sustrato vegetal contenido en algún tipo de recipiente, o bien mediante cultivos totalmente independientes de sustrato, como por ejemplo los cultivos hidropónicos. Pero requieren complejos sistemas auxiliares al propio elemento constructivo (capas de material) e incluso estructuras adyacentes de tipo metálico o plástico que comportan complicaciones asociadas a cargas adicionales o patologías asociadas.

- Los organismos vivos pensados para que se desarrollen sobre este sustrato bioreceptible como las microalgas, los líquenes y los musgos, presentan como particularidad que ninguno de ellos tiene un sistema de raíces real que podría dañar seriamente las estructuras de hormigón. Es conocido el daño que se produce por las raíces de las plantas así como el cambio de apariencia de algunos elementos que se genera por la presencia de otros organismos, situación que también se considera patológica debido a los cambios en el color y las modificaciones en las propiedades de la superficie.

- Se hace interesante la característica dinámica que ofrece este material ya que los colores de la fachada cambiarían con las diferentes estaciones del año, produciendo una variación estético-cromática importante en todo el edificio durante su vida útil.

- Además, gracias a la estructura interna del hormigón biológico, las plantas ajenas a las deseadas no pueden arraigar y así se evita que las raíces más gruesas destrocen por dentro el hormigón como pasa actualmente en cualquier estructura.

6. Debate y apuestas a futuro

- Entendemos que se abren diversas vías para explorar el tema, que aúnan la construcción, la sostenibilidad, la botánica y la biotecnología. En ese sentido, la biotecnología se presenta como un área de producción que puede facilitar cambios radicales en la industria de la construcción por lo que se hace necesario en nuestro medio, aumentar las investigaciones sobre este tema o en esta línea de desarrollo de nuevos materiales más "amigables" con el medioambiente. El trabajo de equipos multidisciplinarios nos parece clave por lo ante dicho.

- Se debería evaluar el desempeño o comportamiento de este nuevo material aplicado en diversos climas aparte del mediterráneo.

Al ser un sustrato poroso que capta agua, puede interesar por ejemplo, estudiar el problema de la heladicidad en determinados climas y cómo puede afectar a esta capa bioreceptible sobre todo en la durabilidad.

- Parece de interés profundizar en el estudio de la segunda capa que oficia como impermeabilizante y protectora del sustrato base (estructura) y a la vez debe facilitar y asegurar la adherencia de la capa de hormigón bioreceptible.

- Puede resultar de interés evaluar los tipos de musgos y líquenes en nuestro clima a fin de ver su adaptabilidad y su aporte a nivel estético.

- Si bien se presenta como una propuesta de alto valor, es un proyecto que está en fase de desarrollo y experimentación por parte de la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad de Gent (Bélgica) sobre todo la fase de crecimiento biológico. En ese sentido, entendemos que aun hacen falta años para evaluar su comportamiento fuera del laboratorio y ver la viabilidad del sistema aplicado tanto en obra nueva como existente.

Agradecimientos

A la orientadora Dra. Arq. Gemma Rodríguez de Sensale, por sus aportes y comentarios.

Referencias

- [1] Organización de Naciones Unidas. Acceso: 04 de Junio, 2019. <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/in dex.html>.
- [2] Manso, S. 2014. "Bioreceptivity Optimisation of Concrete Substratum to Stimulate Biological Colonisation." Ph.D. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya – Departament d'Enginyeria de la Construcció Ghent University – Magnel Laboratory for Concrete Research.
- [3] Edwards, B., 2da Edición ampliada, 2009. Rough guide to sustainability (guía básica de la sostenibilidad). Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili, SL.
- [4] Mares Rueda, Irene S. 2017. "Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire." Trabajo fin de Grado, Universidad Complutense Facultad de Farmacia.
- [5] Holt EA., Miller SW. Bioindicators: Using Organisms to Measure Environmental Impacts. Nature Education Knowledge [Revista on-line] 2010 [Consultado 7 junio 2019] 3(10):8. Disponible en: <http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/bioindicators-using-organisms-to-measure-environmental-impact-s-16821310>.
- [6] Sett R, Kundu M. Epiphytic Lichens: "Their Usefulness as Bio-indicators of Air Pollution". *Donnish Journal of Research in Environmental Studies*. November 2016; 3 (3): 17-24.
- [7] Lee, A.C.K. and Maheswaran, R., "The health benefits of urban green spaces: a review of the evidence", *Journal of Public Health*, 2011, 33 (2): 212-222. R, Kundu M. Epiphytic Lichens: "Their Usefulness as Bio-indicators of Air Pollution". *Donnish Journal of Research in Environmental Studies*. November 2016; 3 (3): 17-24.
- [8] Nielsen, T.S. and Hansen, K.B., Do green areas affect health? Results from a Danish survey on the use of

green areas and health indicators, *Health & Place*, 2007, 13 (4): 839-850.

- [9] Ulrich, R.S., *The Biophilia Hypothesis*, Island Press, 1993. ISBN: 1-55963-147-3.
- [10] Jo, H.K., Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. *Journal of Environmental Management*, 2002, 64: 115-126.
- [11] Getter, K.L. and Rowe, B.D., The role of extensive green roofs in sustainable development, *Hortscience*, 2006, 41 (5): 1276-1285.
- [12] Navarro Portilla, J. 2013. "Los jardines verticales en la edificación." Trabajo final de máster en edificación, Universitat Politècnica de València Escuela técnica Superior- Ingeniería de Edificación.
- [13] Perini K, Ottelé M, Haas E, Raiteri R. Greening the building envelope, façade greening and living wall systems. *Open J Ecol* 2011; 1(1):1-8.
- [14] Manso S, Segura I, Aguado A, Conjunto multicapa en base cemento, aplicable como soporte biológico para fachadas de edificios u otras construcciones, Patent PCT/ES2013/070438, 28 July 2013.
- [15] Manso, S., De Muynck, W., Segura, I., Aguado, A., Steppe, K., Boon, N., De Belie, N., Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth, *Science of the Total Environment*, 2014b, 481: 232-241.
- [16] Heidt, V. and Neef, M., Benefits of urban green space for improving urban climate, *Ecology, planning, and management of urban forests*, 2008, 84-96. ISBN: 978-0-387-71424-0.
- [17] Guillitte O. Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies. *Sci Total Environ* 1995;167:215-20.
- [18] Manso, S., Mestres, G., Ginebra, M.P., De Belie, N., Segura, I., Aguado, A., Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity, *Construction and Building Materials*, 2014a, 54: 485-495.

- [19] Formosa, J., Chimenos, J.M., Lacasta, A.M., Haurie, L., Rosell, J.R., Novel fire-protecting mortars formulated with magnesium by-products, *Cement and Concrete Research*, 2011, 41 (2): 191-196.
- [20] J. Formosa, M.A. Aranda, J.M. Chimenos, J.R. Rosell, Fernández, O. Ginés. "Cementos químicos formulados con subproductos de óxido de magnesio" *Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) - Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 47, 5, 293-297 (2008).*
- [21] Properties and applications of magnesia-phosphate cement mortar for rapid repair of concrete Quanbing Yang, Beirong Zhu, Shuqing Zhang, Xueli Wu College of Materials Science and Engineering, Tongji University, 100 Wu Dong Road, Shanghai 200433, China Received 3 January 2000; accepted 29 August 2000.
- [22] Boncukcuoglu R, Yilmaz MT, Kocakerimb MM, Tosunoglua V. Utilization of borogypsum as set retarder in Portland cement production. *Cem Concr Res* 2002;32(3):471-5.
- [23] Taylor HFW. *Cement chemistry*. London: Academic Press Inc.; 1990.
- [24] McDonnell, M.J., Pickett, S.T.A., Groffman, P., Bohlen, P., Pouyat, R.V., Zipperer, W.C., Parmelee, R.W., Carreiro, M.M., Medley, K. Ecosystem processes along an urban-to-rural gradient, *Urban Ecosystems*, 1997, 1 (1):21-36.
- [25] Paul, M.J. and Meyer, J.L., Streams in the urban landscape, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2001, 32: 333-365.
- [26] Grimm, N.B., Faeth, S.H., Golubiewski, N.E., Redman, C.L., Wu, J., Bai, X., Briggs, J.M., *Global Change and Ecology of Cities*, *Science*, 2008, 319: 756-760.
- [27] Grimm, N.B., Faeth, S.H., Golubiewski, N.E., Redman, C.L., Wu, J., Bai, X., Briggs, J.M., *Global Change and Ecology of Cities*, *Science*, 2008, 319: 756-760.
- [28] Arul ArulrajahTeck-AngKua, Cherd sak Suksiripattanapong, Suksun Horpibulsuk, Jack Shuilong Shen

"Compressive strength and microstructural properties of spent coffee grounds-bagasse ash based geopolymers with slag supplements" *Diario de producción más limpia- Volumen 162*, 20 de septiembre de 2017, páginas 1491-1501 de septiembre de 2017, páginas 1491-1501.

[29] Cherd sak Suksiripattanapong, Teck-Ang Kua, Arul Arulrajah, Farshid Maghool, Suksun Horpibulsuk – "Strength and microstructure properties of spent coffee grounds stabilized with rice husk ash and slag geopolymers" *Construction and Building Materials - Volumen 146*, 15 de agosto de 2017, páginas 312-320

[30] Casañas, V. 2011. "La energía como indicador del impacto ambiental en los sistemas constructivos conformados a partir de materiales de producción nacional." Tesis (Maestría) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2012.

Créditos fotográficos

- Imágenes 1, 2, 3 y 5 - Fuente: el autor.
- Imagen 4- Fuente: www.paisajismourbano.com
- Imagen 6- Autor: José Manuel Juan Fuente: <https://www.cosasdearquitectos.com>
- Imagen 7- Fuente: U.P.C.

Hormigón auto-reparante basado en el uso de bacterias que precipitan minerales

Sofía Gambetta Rossi¹

1. e-mail: gambettasofia@gmail.com

Palabras clave: hormigón, auto-reparante, fisuración, biomateriales.

Resumen: El deterioro del hormigón aparece como uno de los principales problemas de uno de los materiales más usados en la industria de la construcción, deterioro que en una parte considerable de los casos está asociada con la fisuración del material y las consecuencias que conlleva la posterior entrada de agentes ambientales, agua o aire a la pieza a través de dichas fisuras. Además, la fisuración afecta también las capacidades mecánicas del material, reduciendo su capacidad portante. Los hormigones auto-reparantes aparecen como una posible solución a los problemas asociados a la fisuración del hormigón, haciendo que las piezas prolonguen su vida útil y evitando su deterioro, lo que tiene como consecuencias beneficios económicos y de sustentabilidad.

La idea detrás del nuevo material es que sea capaz, por sí mismo, de sellar las fisuras que se produzcan de manera efectiva y duradera. Uno de los desarrollos más prometedores para materiales de auto-reparación es la incorporación de agentes biológicos que produzcan materiales similares al que se debe reparar, por lo que la utilización de bacterias que precipitan minerales resistentes es un interesante caso de estudio para hormigones y morteros en base a cemento Portland.

Key words: concrete, self-healing, cracking, biomaterials.

Abstract: The deterioration of concrete appears as one of the main problems of one of the materials most used in the construction industry, deterioration that in a considerable part of the cases is associated with the cracking of the material and the consequences that entails the subsequent penetration of environmental agents, water or air to the piece through these fissures. In addition, cracking also affects the mechanical capabilities of the material, reducing its holding capacity. The self-repairing concretes appear as a possible solution to the problems associated with the cracking of the concrete, causing the pieces to prolong their useful life and prevent their deterioration, which has economic and sustainability benefits as consequence.

The idea behind the new material is that it is capable, by itself, of sealing cracks that are produced in an effective and lasting way. One of the most promising developments for self-repair materials is the incorporation of biological agents that produce materials similar to those that must be repaired, so the use of bacteria that precipitate resistant minerals is an interesting case study for concretes and mortars in Portland cement base.

1. Introducción

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción. Sin embargo, se presenta como un desafío en lo que a durabilidad, economía y desempeño ambiental se refiere [1]. Las ventajas del hormigón superan en gran medida a aquellas de otros materiales, por lo que no parece que en el futuro pueda ser reemplazado por otro de menor impacto. Debido a los procesos necesarios para la fabricación de uno de sus componentes principales, el cemento Portland, la huella ecológica del material es alta [1]. Además, el consumo de agua y materiales de cantera como roca y arena asociados al hormigón convencional o de mayor uso en la industria, no ayudan a mejorar el comportamiento hacia el medio ambiente. Por último, también se deben tener en cuenta las adiciones y aditivos químicos que se usan para la fabricación, colocación o mantenimiento del material y su impacto tanto ecológico como en el costo de una pieza de hormigón.

Uno de los principales problemas del hormigón reside en su vida útil y desempeño durante la misma, factores que se ven ambos afectados por mecanismos de fisuración que se dan tanto por la naturaleza del material como por la acción de agentes externos [2]. Las causas de los procesos de fisuración se establecerán en las siguientes secciones, pero es importante entender que es un fenómeno que afecta siempre al material para comprender la pertinencia de este a la hora de abordarlo. Tanto la micro fisuración como la fisuración del material tienen como consecuencia penetración de agentes agresivos que provocan una disminución en sus prestaciones mecánicas y consecuentemente una disminución en su potencial vida útil.

Otro problema, relacionado al anterior, radica en las dificultades asociadas a las reparaciones del material al producirse fisuración. Se deben tener en cuenta las características de las piezas [3], su ubicación en la edificación; puente, túnel, bajo agua o enterrada, en centrales nucleares, su función en la estructura, la relevancia a nivel estético, entre otros.

Actualmente, las piezas de hormigón que, durante su vida útil, muestran necesidad de mantenimiento o reparación se pueden reparar mediante diversos métodos, con sus ventajas y desventajas asociadas [4] o sustituir parcial o totalmente, lo que implica un uso de material adicional que no se hubiese utilizado si la pieza no hubiese fallado tempranamente.

Sin embargo, se ha estudiado y comprobado que el hormigón tiene ciertas capacidades de auto-reparación de las fisuras en condiciones específicas [2][5]. Se han descubierto que procesos que ocurren durante la etapa de servicio de una pieza tales como la hidratación tardía de partículas de cemento, la cristalización del carbonato de calcio o el depósito de material sólido procedente del agua podrían ser mecanismos naturales de sellado de fisuras [2][5][6].

Por lo tanto, es evidente que llevar adelante un mejor uso del material, mejorar las condiciones de durabilidad de las piezas ya existentes o proyectadas y potenciar la capacidad auto-reparante del material, son las bases para obtener una reducción del impacto ambiental de éste y mejorar su desempeño [2]. Cualquier medida que se tome hacia alargar la vida útil del hormigón redundará en beneficios tanto ambientales como económicos [2][7].

En tal sentido, varios materiales inteligentes han surgido como una alternativa a los materiales convencionales. Estos materiales presentan la capacidad de notar cambios en su ambiente, procesarlos y responder a dichos cambios de manera autónoma, sin la necesidad de intervención humana en ninguno de esos procesos [8]. Dentro de esta familia, uno de los campos de investigación es el relacionado a los materiales auto-reparantes. La característica principal de este tipo de materiales es su capacidad para reparar defectos en sí mismos de manera autónoma, asociados a defectos que aparecen con frecuencia. Los procesos de auto-reparación que se han explorado han sido a través de mecanismos que van desde la nanotecnología al uso de componentes biológicos que conforman los llamados bio-materiales, línea de investigación

que se perfila como la más exitosa y prometedora para el desarrollo de materiales que sean capaces de auto repararse [6].

El hormigón auto-reparante aparece, entonces, como una alternativa válida al paradigma de un material que se elabora y luego se repara al hallarse patologías en el mismo. La idea radica en un hormigón que a través de su propia composición pueda rellenar las fisuras que se presenten durante su vida útil de manera autónoma, detectándolas y reparándolas a medida que se presentan, manteniendo o incluso mejorando sus capacidades portantes, impermeabilidad ante agentes ambientales o agua, alargando así su vida útil [2].

Este trabajo pretende mostrar, a través de una revisión bibliográfica, el estado actual de la cuestión del hormigón auto-reparante y una forma práctica de aplicación: mediante el uso de componentes biológicos. El mecanismo, en términos generales, propone incorporar al amasado del hormigón, o mediante soluciones reparadoras, bacterias que al activarse son capaces de precipitar minerales, rellenando micro fisuras y fisuras que puedan aparecer en la masa de hormigón antes de que estas generen patologías en la pieza. Se revisarán brevemente las causas más comunes de fisuración en el hormigón, algunas cuestiones asociadas a su reparación y se presentarán los avances de dos líneas de aplicación de la nueva tecnología de uso de bacterias que precipitan minerales: el uso como agente reparador en hormigón envejecido y el uso en hormigones nuevos a través de la adición durante el amasado.

2. Deterioro del hormigón

En esta sección se presentan brevemente, a través de la revisión de tres autores, las principales causas de fisuración del hormigón. A pesar de que en teoría el hormigón auto-reparante puede ser usado en la gran mayoría de los casos de deterioro por fisuración del hormigón convencional, la tecnología desarrollada hasta el momento tiene ciertas limitantes, como se tratará más adelante, por lo que las causas y dimensiones de las fisuras es pertinente para el estudio de la nueva tecnología.

2.1 Causas

En todas las construcciones en las que el cemento es un componente existen fisuras [9]. Sin embargo, el cemento no es siempre el culpable de estas, ya que las propiedades y el comportamiento del hormigón no dependen tan sólo del cemento, aunque tiene gran participación. Debido a que la heterogeneidad del comportamiento de la pasta de cemento es un problema muy complejo y multicausal, suele causar confusión, “de dos piezas semejantes, en condiciones iguales, una se fisura y la otra permanece intacta” [9].

En su libro, Joisel [9] propone una clasificación primaria y general de las principales causas de las fisuras en el hormigón:

- a. Deformaciones
- b. Retracción hidráulica
- c. Retracción térmica
- d. Entumecimiento
- e. Otras causas o combinaciones de las anteriores

Se presentan también algunas causas de las fisuras en el hormigón según el Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, separándolas según correspondan a la etapa plástica o endurecida del material [10].

- a. Estado plástico
 - a. Retracción plástica
 - b. Precipitación de los agregados
- b. Estado endurecido
 - a. Retracción por secado
 - b. Tensiones de origen térmico
 - c. Reacciones químicas
 - d. Meteorización
 - e. Corrosión de las armaduras
 - f. Prácticas constructivas inadecuadas
 - g. Sobrecargas durante la construcción
 - h. Errores de diseño y detallado
 - i. Cargas aplicadas externamente

En un libro editado por Paulo Helene y Fernanda Pereira [3], se puede encontrar un capítulo sobre las “Acciones y mecanismos de deterioro en las

estructuras de concreto”, en las que se presentan no sólo la fisuración sino otros tipos de deterioro que el hormigón puede sufrir a lo largo de su vida útil.

- a. Corrosión de las armaduras
- b. Acciones de cargas exteriores: tracción axial, compresión axial, flexión y corte, flexión compuesta, torsión, impacto.
- c. Cambios de temperatura y humedad: efecto de los cambios de temperatura y de contenido de humedad sobre la estabilidad volumétrica, efecto de la repetición de ciclos térmicos o ciclos de mojado-secado.
- d. Acciones que generan desintegración: acciones de las bajas temperaturas y efecto de los ciclos hielo-deshielo, acción del fuego, ataque por ácidos y bases, acción de los sulfatos, reacciones deletéreas de los agregados, abrasión y desgaste, lixiviación y eflorescencia.
- e. Acciones inducidas: fluencia, asentamiento, pretensado.
- f. Fallas constructivas: deficiencia en el detalle o posicionamiento de las armaduras, deficiencia en los encofrados.
- g. Acción sísmica.

Como se puede observar, en las tres referencias citadas, la fisuración y posterior deterioro del hormigón asociado a estas están sujetos a variadas causas, incluso combinadas entre sí. La pertinencia del tema está dada entonces por la inevitabilidad de la fisuración.

Las consecuencias de estas fisuraciones derivan así en dos problemáticas: el acortamiento de la vida útil de la estructura y la necesidad de reparación o sustitución de piezas con sus costos e impactos ambientales asociados.

3. Auto-reparación en hormigón

Como se vio anteriormente, la fisuración está ligada a la naturaleza del comportamiento del cemento Portland, además del comportamiento inherente a las estructuras de hormigón y es inevitable que

suceda. Por lo anterior, la reparación y auto-reparación de las estructuras de hormigón son prioritarias a la hora de prolongar la vida útil y mejorar las prestaciones del material a lo largo del tiempo.

Se puede clasificar la auto-reparación del hormigón en dos categorías: autógena y autónoma [2]. Se ha descubierto que mediante procesos tardíos de hidratación naturales de las partículas de cemento Portland, así como reacciones químicas que también se dan naturalmente en los componentes de la pasta hidratada, el hormigón tiene la potencialidad de sellar fisuras. A esta potencialidad se le conoce como auto-reparación autógena. La auto-reparación autónoma refiere a procesos que se llevan a cabo gracias a la incorporación de tecnología al hormigón y que no dependen de los compuestos convencionales del material.

En el campo de la auto-reparación autónoma es que aparecen los conceptos de material inteligente y de auto-reparación pasiva y activa, que dan cuenta de la incorporación de compuestos, adiciones o elementos tecnológicos al hormigón para convertirlo en un material que es capaz de repararse a sí mismo.

3.1 Materiales inteligentes y el fenómeno de auto-reparación

En ingeniería de materiales, un camino para el mejoramiento de las prestaciones de un material se centra en aumentar la resistencia o rigidez para que el mismo pueda soportar mayores esfuerzos y evitar el mecanismo de falla [2]. Este paradigma se podría categorizar como de prevención del deterioro. Para que un material sea más resistente y rígido, es necesario que sus átomos tengan una unión de enlace fuerte en una porción de volumen lo más pequeña posible [2], por lo que mejorar estos enlaces en los materiales sería un camino para lograrlo.

Otro camino, más contemporáneo en lo que al desarrollo de materiales se refiere, consiste en la investigación dentro de la línea de los materiales inteligentes.

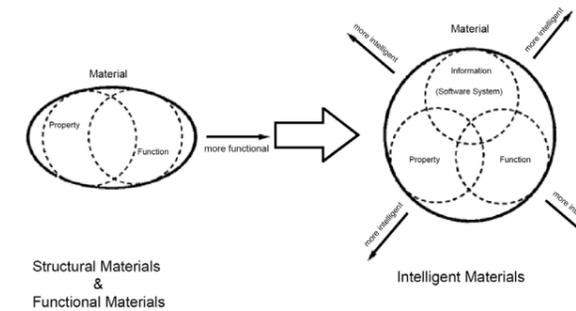


Fig. 1 Materiales estructurales y funcionales versus materiales inteligentes (Takagi, 1990)

El de material inteligente es un concepto ampliamente aceptado en el campo de la investigación de materiales. Según Takagi [8], son “materiales que responden a los cambios ambientales en las condiciones óptimas y manifiestan sus propias funciones de acuerdo con los cambios.” (Fig. 1)

En términos generales, la evolución de materiales ha transitado desde los materiales estructurales a aquellos funcionales y polifuncionales, siendo, según Takagi, el siglo XXI el siglo de los materiales inteligentes.

Un material inteligente es capaz de llevar adelante tres funciones de manera autónoma:

- a. Detección: encontrar y detectar la presencia de problemas, tales como fisuración.
- b. Evaluación: juzgar si se deben tomar acciones, cuáles, dónde y cuándo deben tomarse.
- c. Acción: llevar a cabo las acciones necesarias, por ejemplo de reparación o sellado de la fisura.

En este sentido, surge el concepto del manejo del deterioro en contraposición a aquel de prevención y este nuevo paradigma forma la base del concepto de auto-reparación en materiales. El manejo del deterioro está basado en la noción de que el daño, fisuración o deterioro del material no es problemático siempre que pueda ser contrarrestado por procesos de recuperación o reparación de ese daño [2]. El comportamiento de un material auto-

reparante depende entonces de los dos procesos que se retroalimentan entre sí, el mecanismo de deterioro y el mecanismo de reparación.

En cuestiones prácticas, así como los materiales inteligentes se conceptualizaban a través de tres funciones, la idea de auto-reparación también abarca tres pasos que deben llevarse a cabo [2]. Primero, se debería establecer un rango de aceptabilidad del deterioro, ya que la falla del material no siempre es total, sino que es progresiva y es en ese proceso que se encuentran los potenciales de auto-reparación. Segundo, se debe establecer el disparador para que el mecanismo de auto-reparación se active. Para tal caso, son necesarios por lo menos dos datos: lugar y momento, dónde y cuándo es necesario. Por último, una vez que el mecanismo es disparado, se necesita transportar el material de reparación al lugar donde es necesario. Estos tres pasos se deben llevar a cabo en todos los materiales auto-reparantes.

3.2 Pertinencia de la auto-reparación en materiales de base de cemento Portland

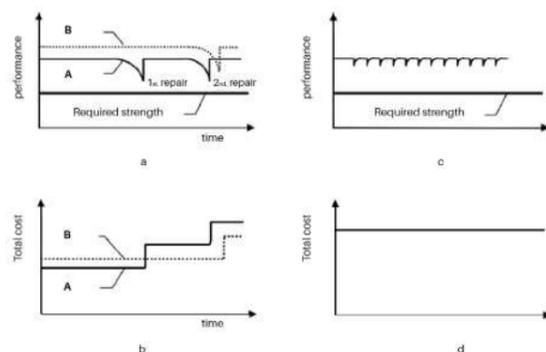
Como se esbozó en la sección 2, la fisuración en materiales cuyo componente principal es el cemento Portland es un fenómeno multicausal e inherente del material, por lo que el paradigma de prevención del deterioro no es siempre útil para eliminar el problema. Más allá de las causas, la consecuencia del proceso de fisuración es que la resistencia del material a las acciones futuras, ya sean mecánicas como ambientales, se ve disminuida. Para poder recuperar esa resistencia, se deben tomar medidas

de reparación. Si la recuperación es llevada a cabo por el material mediante un proceso incluido desde el diseño de este se habla de un fenómeno de auto-reparación, en cambio, si incluye una intervención humana estaríamos hablando de reparación convencional [2].

La industria del cemento Portland es una importante fuente global de NOx, una fuente modesta de SOx, y una fuente muy grande y colectiva de CO2 [1]. Las cuestiones ambientales asociadas a la fabricación del cemento están además vinculadas a la obtención de las materias primas, la energía incorporada y el transporte. En general, la industria del cemento emite aproximadamente el 1,4% del total de las emisiones antropogénicas de CO2 de los Estados Unidos (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2002); en muchos países en todo el mundo, la contribución es relativamente más alta, cercana al 5% [1].

En temas económicos, la experiencia indica que una calidad inicial más alta del material resulta en menores costos de mantenimiento y reparación [2]. Se debería encontrar un balance óptimo de costos iniciales y costos de mantenimiento y

Fig. 2 Desempeño (a) y costos (b) en el transcurso del tiempo para estructuras normales (A) y de alta calidad (B). Costos directos de reparación incluidos. Rendimiento (c) y costo (d) de una estructura hecha con hormigón auto-reparante en el transcurso del tiempo. No se consideran los intereses e inflación. (RILEM, 2013)



reparación, siendo el caso ideal que los últimos se redujeran a cero al material repararse por sí mismo. (Fig. 2)

3.3 Auto-reparación autógena

Se conoce como auto-reparación autógena al proceso en el cual la recuperación usa materiales que son componentes del hormigón que están presentes incluso cuando el material no fue diseñado para ser auto-reparante [2].

En hormigón fisurado, pequeñas fisuras sin desplazamiento se repararán completamente en presencia de humedad [5]. Esta es una habilidad que el hormigón tiene naturalmente para sellar sus micro fisuras, recuperar su capacidad impermeable y reducir la degradación por fenómenos químicos [11].

Para Neville, este proceso de auto-reparación natural del hormigón se puede dar por tres mecanismos: la hidratación de partículas de cemento que no fueron hidratadas en las primeras edades del hormigón debido a la penetración de agua a través de las propias fisuras, a la formación

Fig. 3 Diferentes causas del fenómeno de auto-reparación autógena (RILEM, 2013)

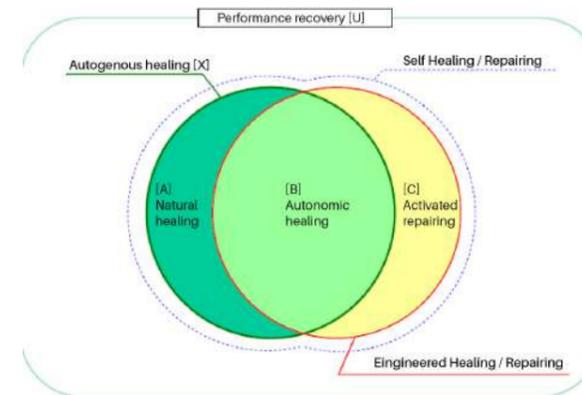
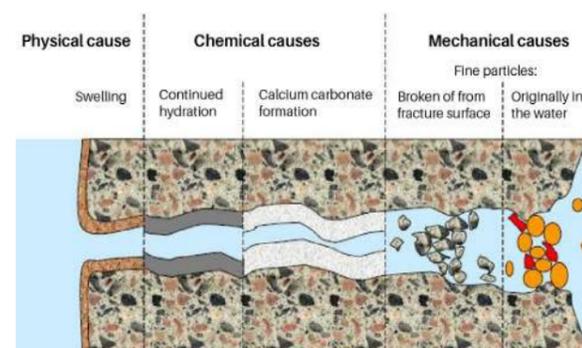


Figura 4 Diagrama de Venn que explica la terminología asociada al fenómeno de auto-reparación según JCI TC-0758 (RILEM, 2013)

de carbonato de calcio debido al fenómeno de carbonatación y reacciones asociadas o debido a la deposición de material particulado que ingresa con agua a las fisuras [5].

Para otros autores [6], el fenómeno de reparación natural está causado por tres procesos: la expansión de la pasta cementicia, la hidratación de partículas no hidratadas y la precipitación de carbonato de calcio, siendo la última la más relevante. Sin embargo, el potencial de auto-reparación mediante precipitación de carbonato de calcio y por lo tanto el potencial de sellar fisuras está condicionado por la cantidad de iones disponibles en la fisura.

En resumen, se pueden establecer tres tipos de causas para el fenómeno: físicas, químicas y mecánicas [2]. (Fig. 3)

La auto-reparación autógena es un fenómeno con ciertas limitaciones. La primera es que es potencial e incierto, ya que depende de muchas condiciones y no es controlado o inducido por el diseño del material. Otra limitación importante radica en el ancho de las fisuras que no puede superar ciertos límites establecidos por la experiencia [5]. Además, para algunos procesos es necesaria la presencia de agua y CO2 dentro de la fisura, condición que no siempre es alcanzada [2]. Otras limitaciones son el tipo de fisura, la edad del hormigón, la ubicación de la pieza o la dosificación y composición del hormigón.

3.4 Auto-reparación autonómica

Se define como el proceso de auto-reparación en el cual la recuperación usa materiales o componentes que de otra manera no hubiesen estado presentes en el material [2]. Estos componentes son incluidos en el diseño del material para que cumplan la función específica de auto-reparación.

Los sistemas autonómicos en los que un material ajeno al hormigón es el encargado de la reparación están en la vanguardia de las investigaciones más recientes. Estos sistemas se pueden clasificar en diferentes niveles dentro de los materiales inteligentes según su comportamiento [2], y pueden incluir:

- Pegamentos o resinas contenidas dentro de fibras de cierta fragilidad.
- Mecanismos de reparación activados mediante calor externo.
- Agentes expansivos.
- Minerales precipitados por microorganismos.

En términos generales, hay dos tipos de mecanismos de auto-reparación autonómica: pasiva y activa. La primera es aquella que se da en el material a través de su diseño e incorporación de componentes pero sin necesidad de intervención humana posterior, como puede ser la acción de bacterias que precipitan minerales. La segunda

es la que se da mediante mecanismos artificiales, pero debe ser inducida por una intervención humana, mediante la aplicación de calor o a través de actuadores externos, por ejemplo (Fig. 4). Solamente en el caso de que el material necesitara ser reemplazado o añadido mediante intervención humana, el proceso no se consideraría más auto-reparación sino reparación convencional.

4. Uso de bacterias

El uso de agentes biológicos para el desarrollo de hormigones auto-reparantes es una de las líneas de investigación que ha tomado más fuerza en los últimos años [11]. Esto se debe a que en la naturaleza están presentes los procesos de detección, evaluación y acción que se mencionaron anteriormente como característica principal de los materiales inteligentes.

En el caso de materiales como hormigón o roca, la precipitación de carbonato de calcio debido a la acción bioquímica de bacterias ha surgido como un campo de exploración. La potencial aplicación de bacterias que producen ciertos minerales para la reparación de monumentos de piedra caliza y el sellado de fisuras en el hormigón está siendo investigada desde hace por lo menos una década [11]. Para Jonkers [7], la principal ventaja de este mecanismo es que las bacterias son capaces de transformar componentes aptos para estar presentes en el amasado del hormigón en un material adecuado para el relleno de fisuras.

4.1 Mecanismo de precipitación de minerales inorgánicos

En líneas generales, existen diversas bacterias que son capaces de precipitar carbonato de calcio o minerales similares. Sin embargo, el proceso no es siempre inherente a las bacterias sino que dependen en gran medida de las condiciones ambientales. Las bacterias, al emplear vías metabólicas específicas, cambian las condiciones ambientales de tal manera de aumentar la precipitación de minerales [6]. Las bacterias que tienen el potencial de precipitar estos minerales lo harán o no, dependiendo del entorno y demás condiciones

en las que se encuentren. La precipitación de piedra caliza impulsada por bacterias es, entonces, el resultado de una combinación específica de una vía metabólica, actividad y condiciones ambientales fisicoquímicas [6].

En este sentido, se está investigando [6] el uso de distintos tipos de bacterias que usan distintas vías metabólicas para la precipitación de minerales.

4.1.1 Hidrólisis enzimática de la urea

Un mecanismo de formación de carbonato de calcio por estas bacterias se basa en la hidrólisis enzimática de la urea en amoníaco y dióxido de carbono. La reacción provoca un aumento del pH desde condiciones neutrales a alcalinas, lo que da como resultado la formación de iones de bicarbonato y carbonato que precipitan con los iones de calcio presentes para formar minerales de carbonato de calcio [11]. Las bacterias que se seleccionan son formadoras de esporas ya que son estas las que pueden sobrevivir en la masa del hormigón, ya que se introducen tanto las bacterias como los nutrientes durante el amasado. Las esporas de las bacterias permanecen latentes y se activan cuando en las fisuras entra agua y oxígeno, comenzando a nutrirse siempre y cuando las condiciones de temperatura y pH sean las compatibles con su capacidad metabólica [6].

Un inconveniente de este mecanismo de reacción es que para cada ion carbonato se producen simultáneamente iones de amonio, lo que puede resultar en una carga excesiva de nitrógeno ambiental [11] y desencadenar procesos de deterioro de las armaduras en el caso de hormigón armado. Además, las bacterias deben estar encapsuladas para que las esporas no se dañen durante el amasado o aplicación [6].

4.1.2 Oxidación del carbono orgánico

La precipitación biológica de carbonato de calcio y la producción de dióxido de carbono pueden ocurrir durante la degradación de compuestos orgánicos, con presencia de carbono, donde las bacterias actúan como catalizadores [6]. Un

ejemplo de esto es el caso de hormigón auto-reparante con oxidación de carbono orgánico que se desarrolló en la Universidad de Tecnología de Delft. En este hormigón, el agente curativo consiste en esporas bacterianas alcalifílicas, lactato de calcio y extracto de levadura. Todos los componentes se disuelven en agua y se impregnan en agregados livianos (LWA) [6].

4.1.3 Oxidación anóxica del carbono orgánico

Surge como una posible solución ya que debido a la poca presencia de oxígeno en las fisuras, el potencial desarrollo de las bacterias aeróbicas se veía limitado a la aplicación del mecanismo solamente a la superficie. La tasa de precipitación del carbonato de calcio depende principalmente de la concentración inicial de bacterias, la tasa de crecimiento de estas y de la actividad metabólica específica de cada bacteria en el ambiente. [6]. Por lo tanto, la condición en las fisuras del hormigón en profundidad, en la mayor parte de los casos, beneficia a las bacterias desnitrificantes en lugar de a las aeróbicas.

A la vez, en el desarrollo y aplicación de esta línea de investigación se pueden distinguir dos caminos: la aplicación del mecanismo en estructuras existentes a través de métodos de inyección, inmersión o vaporización [12] y la aplicación para el desarrollo de un hormigón auto-reparante adicionando las bacterias y demás componentes a la masa del hormigón [11].

4.2 Aplicación para reparación de estructuras existentes

A través del desarrollo de soluciones líquidas se ha investigado la posibilidad de aplicación del mecanismo de precipitación de minerales a través de bacterias en hormigón endurecido. Esta aplicación se ha llevado adelante tanto en laboratorio como en estudios de campo aplicándola en edificaciones o pavimentos fisurados [6][13]. Un ejemplo de un líquido reparador ha sido desarrollado en la Universidad de Tecnología de Delft, diseñado particularmente para ser aplicado

en hormigón en edad de servicio, cuando ya está endurecido y envejecido [12]. El líquido está formado por tres componentes:

- a. Bacterias alcalifílicas que precipitan calcita.
- b. Nutrientes y precursores minerales como lactato de calcio y levaduras.
- c. Solución de transporte.

Otras investigaciones en la misma universidad [12] han indagado el potencial del líquido para ser aplicado en un hormigón poroso desarrollado especialmente, ya que como se mencionó antes, uno de los mayores inconvenientes de este tipo de soluciones es la dificultad de alcanzar profundidad en la sección de la pieza de hormigón.

Sin embargo, para la aplicación superficial del líquido reparador, las experiencias muestran resultados satisfactorios. Una experiencia llevada a cabo en los entresijos de un garaje en el cual las fisuras del hormigón estaban causando filtraciones de agua y problemas de congelamiento muestran resultados prometedores [13]. En el trabajo de campo se pretendía probar la eficiencia del líquido reparador antes mencionado fuera del laboratorio. Los resultados fueron que después de la aplicación de la solución las fisuras fueron selladas, de tal manera que las filtraciones desaparecieron y que la resistencia de la estructura al congelamiento y deshielo mejoró notoriamente [13].

4.3 Aplicación en la masa de hormigón

Además de las soluciones para reparación de estructuras existentes, otra línea de investigación es aquella que busca incorporar el mecanismo de auto-reparación a la masa de hormigón antes del llenado. De esta manera, el agente reparador se encuentra distribuido en toda la pieza y puede activarse cuando comienza el proceso de fisuración. Además, se disminuye el trabajo asociado a la aplicación del agente reparador, lo que implica una reducción en los costos de mantenimiento del hormigón durante su vida útil y un aumento en su durabilidad [11].

Un desafío en el desarrollo de este material fue encontrar las bacterias que pudieran sobrevivir

dentro de la masa del hormigón durante largos períodos de tiempo [11], y además incorporar también en la masa los nutrientes necesarios para que las bacterias puedan desarrollarse. Todo esto teniendo en cuenta las potenciales afectaciones que podrían tener en las prestaciones del hormigón.

Algunos investigadores de la Universidad Tecnológica de Delft han explorado diferentes bacterias y nutrientes para utilizar en el amasado del hormigón [11]. Una conclusión para resaltar parece ser el uso del lactato de calcio como compuesto precursor del mineral, ya que el mismo reduce la producción de amoníaco en comparación a la urea y por lo tanto reduce la potencialidad de corroer el hierro de las armaduras [11]. Además, descubrieron que la cantidad máxima admisible del compuesto precursor mineral introducido en la mezcla está limitada, ya que cantidades mayores pueden afectar negativamente a otras propiedades del hormigón, como el fraguado y la resistencia.

Otra conclusión para destacar es que el mejor comportamiento de las bacterias se da en hormigones jóvenes, por lo que la edad del hormigón juega un papel importante en el mecanismo y se aplica mejor para las primeras micro fisuraciones, resultando en un hormigón más compacto e impermeable desde las primeras edades [11]. Esto podría implicar una potencial ventaja ya que resultaría en un incremento en la durabilidad del hormigón, pero podría verse también como una desventaja ya que el material perdería su capacidad auto-reparante con el tiempo.

Para este caso, la encapsulación del agente reparador es importante ya que el amasado y colocación podrían dañarlo [6]. Sin embargo, la presencia de las cápsulas podría disminuir la resistencia, por lo cual se debe seguir investigando en esta línea. Una propuesta podría ser la incorporación de aire en el amasado, para que las bacterias puedan alojarse allí y de esa manera evitar el encapsulado [11].

En conclusión, la aplicación del mecanismo de auto-reparación a través del uso de bacterias

adicionadas al hormigón durante el amasado es posible y prometedor. Sin embargo, existen aún líneas de investigación a ser exploradas para alcanzar una mejor funcionalidad y aplicabilidad del mecanismo.

5. Consideraciones finales

El hormigón se encuentra siempre atado a procesos de investigación y desarrollo de tecnologías que puedan mejorar o modificar sus prestaciones. Una de las áreas en las que es importante y necesario mejorar el desempeño del material está relacionado a su impacto ambiental. Además, el mecanismo de fisuración inevitable e inherente al comportamiento del cemento Portland es la causa más frecuente del deterioro de las estructuras de hormigón.

En ese sentido, cualquier decisión o desarrollo que mejore la durabilidad de las estructuras de hormigón tendrá como resultado una reducción en el impacto ambiental del material ya que una estructura más duradera implica menores usos de materiales y recursos para su mantenimiento y menores reemplazos o pérdidas de materiales por deterioro.

Los materiales auto-reparantes surgen entonces como un campo relevante de estudio ya que alargan su vida útil y reducen los impactos asociados a su mantenimiento y reparación. Relativo al hormigón, surgen varias líneas de investigación que buscan desarrollar alternativas al paradigma actual de mantenimiento, reparación y sustitución de las estructuras. En esta línea es que los agentes biológicos aparecen como un mecanismo prometedor para el desarrollo de hormigones que se reparen a sí mismos.

Dentro de las investigaciones más recientes, se pueden encontrar dos caminos prometedores: el desarrollo de agentes reparadores para estructuras existentes y la aplicación del mecanismo en hormigones nuevos. En ambos casos, la investigación ha estado centrada en encontrar las bacterias, nutrientes y componentes precursores adecuados, que puedan sobrevivir en

la masa de hormigón y que puedan ser activados autónomamente por el propio proceso de fisuración, de manera de actuar pertinentemente.

En conclusión, el desarrollo de hormigones auto-reparantes está aún en procesos de investigación

y desarrollo, buscando la efectividad de los componentes, los mejores procesos de aplicación e implementación, pero parece ser una interesante mirada para el desarrollo de futuros hormigones que puedan reducir su impacto ambiental y mejorar su durabilidad y prestaciones con el tiempo.

Referencias

- [1] van Oss. H.G., 2005. Background Facts and Issues Concerning Cement and Cement Data. Open File Report, U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey.
- [2] de Rojij, M., and Van Tittleboom, K., and De Belie, N., and Schlangen, E., 2013. Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials. London: Springer Dordrecht Heidelberg.
- [3] Helene, P., and Pereira, F. 2007. Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto. Sao Paulo: Cargraphics Ed.
- [4] ACI Committee 224, 1998. Causes, evaluation and repair of cracks in concrete structures. Report.
- [5] Neville, A.M., 1963. Properties of concrete. Harlow: Pearson.
- [6] Tziviloglou, E., Palin, D., Sierra-Beltrán, M.G., Mors, R., V., Wiktor, V., Jonkers, H.M., Schlangen, E., et al., 2016. Bio-Based Self-Healing Concrete: From Research to Field Application. Switzerland: Springer International Publishing.
- [7] Jonkers, E. 2017. "Toward Bio-based geo- & Civil Engineering for a Sustainable Society." *Procedia Engineering*. 171: 168-175.
- [8] Takagi, T. 1990. "A concept of intelligent materials" *Journal of intelligent materials, systems and structures*. 1: 149-156.
- [9] Joisel, A. 1981. Fisuras y grietas en morteros y hormigones: sus causas y remedios. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- [10] Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC). 1990. Control del agrietamiento de estructuras de concreto. México: Ed. Limusa
- [11] Jonkers, H.M., Thijssen, A., Muijzer, G., Gopuroglu, O., Schlangen, E., 2010. "Application of bacteria as a self-healing agent for the development of a sustainable concrete". *Ecological engineering*. 36: 230-235.
- [12] Sangadji, S., Wiktor, V., Jonkers, H.M., Schlangen, E., 2017. "The use of alkaliphilic bacteria-based repair solution for porous network concrete healing mechanism." *Procedia Engineering*. 171: 606-613.
- [13] Wiktor V., Jonkers H.M., 2015. "Field performance of bacteria-based repair system: pilot study in a parking garage". *Case Studies in Construction Materials*. 11-17.

Hormigón coloreado, un estado del arte

Viviana De Lima¹

1. e-mail:videlima@gmail.com

Palabras clave: hormigón coloreado, pigmentos, medición del color, durabilidad del hormigón coloreado.

Key words: colored concrete, pigments, color measurement, colored concrete durability.

Resumen: En este artículo se aborda una revisión de la bibliografía disponible en relación al hormigón coloreado en masa. En este sentido se define el pigmento como tal, sus propiedades, y clasificación. Se describe brevemente el color y el sistema de medición CIELAB, ampliamente utilizado en la industria para la evaluación del color y medición. Se estudia la evaluación de la estabilidad del color en el hormigón coloreado en masa a través del tiempo, y los factores que la afectan. Se analizan las propiedades reológicas del hormigón, y del hormigón endurecido, así como la durabilidad, a la luz de la incorporación de diferentes pigmentos y cómo estas propiedades se ven afectadas por ellos, así como también unas breves consideraciones prácticas.

Abstract: In this article a review of the bibliography available regarding mass colored concrete is addressed. In this respect, an approach of the pigment as such, its properties, and classification is made. The color is briefly described as the CIELAB measuring system, which is widely used in the industry for color evaluation and measurement. The evaluation of the stability of color in concrete over time is studied, and the factors that affect it. The rheological properties of concrete and hardened concrete are analyzed, as well as the durability, in light of the incorporation of different pigments and how these properties are affected, as well as some brief practical considerations.

1. Introducción

El hormigón es actualmente el material más usado en construcción, si bien presenta muchos beneficios, desde el punto de vista estético su aspecto rústico a la vista y color gris característico, pueden generar cierta monotonía. Estas características están determinadas por su propia naturaleza y la de los materiales que lo componen.

La incorporación de pigmentos coloreados, le han brindado la posibilidad de un nuevo atractivo desde el punto de vista estético. Esto ha venido acompañado por nuevos descubrimientos como por ejemplo la posibilidad de que algunos pigmentos

colaboran en forma importante en el aumento de las resistencias a compresión, algo que hasta hace pocos años se desconocía.

2. Tipos y propiedades de pigmentos

Pigmento definición

Es una sustancia que consiste de pequeñas partículas que es prácticamente insoluble en el medio aplicado y que se utiliza por sus propiedades ópticas, protectoras o decorativas, de acuerdo a lo que se define normativamente [1].

Nombre común	Fórmula	Denominación química	Color
Óxido de hierro rojo	Fe ₂ O ₃	Óxido férrico	Rojo
Óxido de hierro amarillo	Fe (OH) 2	Hidróxido ferroso	Amarillo
Óxido de hierro negro	Fe ₃ O ₃	Óxido ferroso-férrico	Negro
Óxido de hierro marrón	mezcla	...	Marrón
Óxido de cromo	Cr ₂ O ₃	Óxido de cromo	Verde
Óxido de cobalto	Co(Al-2Cr)2 O4	Aluminato de cobalto	Azul
Dióxido de titanio	Ti O ₂	Dióxido de titanio	Blanco

Tabla 1 Identificación del nombre común y fórmula química de pigmentos a base de óxidos utilizados en hormigones. Fuente: Positieri, M. 2005. "Propiedades fisicomecánicas y durabilidad del hormigón coloreado" Ph.D. thesis, Universidad Nacional de Córdoba.

Tanto pigmentos como colorantes, se incluyen en el término general de "materiales colorantes", que denota que son materiales usados por sus propiedades colorantes. La característica que distingue a los pigmentos de los colorantes orgánicos solubles es su baja solubilidad en solventes y aglutinantes. Los pigmentos pueden ser caracterizados por su composición química, y por sus propiedades ópticas y técnicas [2].

Extensores de pigmentos o cargas son sustancias en forma de polvo que son prácticamente insolubles en el medio en que son aplicados. Son generalmente blancos o apenas coloreados, y se utilizan debido a sus propiedades físicas o químicas. La diferencia entre un extensor y un pigmento recae en el propósito para el que se lo utiliza. Un extensor no es un colorante, se lo emplea para modificar las propiedades o para aumentar el volumen de un determinado material [2].

2.1 Desarrollo industrial de los pigmentos

Algunos datos históricos nos muestran el gran desarrollo que ha tenido la industria del pigmento

	Clase química	Pigmentos blancos	Pigmentos negros
Pigmentos inorgánicos	Óxidos	Dióxido de titanio	Óxido de hierro negro
		Zinc blanco	Hierro-manganeso negro
	Sulfuros	Sulfuro de zinc Litopona	Espinela negra
Pigmentos orgánicos	Carbono y carbonatos	Plomo blanco	Carbón negro
	Pigmentos de perileno	Polvos de resina blanca	Perileno negro
	Otros		Anilina negra Negro antraquinona

Tabla 2 Clasificación de pigmentos blancos y negros [2]. Fuente: Traducido de Voltz, H., 2002. Industrial color testing. Willey DCH..

en los años recientes, teniendo un gran impulso en el siglo XX. La industria del pigmento se inició en el siglo XVIII con productos tales como azul Berlín (1704), azul cobalto (1777), verde de Schelle y amarillo cromo (1778). En el siglo XIX, el desarrollo de los pigmentos verde de Guignet, los pigmentos cobalto, los pigmentos de óxido de hierro, los pigmentos cadmio y los pigmentos azul ultramar se sucedieron rápidamente. En el siglo XX, los pigmentos se transformaron rápidamente en tema de investigación científica. En las décadas pasadas recientes, los pigmentos sintéticos coloreados rojo cadmio, azul manganeso, rojo de molibdeno y óxidos mixtos de bismuto salieron al mercado. El dióxido de titanio, con estructuras de anatasa o rutilo, y el óxido de zinc acicular fueron introducidos como nuevos pigmentos y extensores blancos sintéticos, respectivamente. Los pigmentos de brillo (efecto metalizado, perlados/brillo, y pigmentos de interferencia) han tenido creciente importancia [2]. El desarrollo de pigmentos para la industria de la construcción, y en particular para hormigones ha dado lugar a un nuevo tipo de hormigones especiales, los hormigones coloreados. Los principales pigmentos utilizados se expresan en la Tabla 1.

A. Abel, reflexiona que, no hay duda de que los últimos 150 años fueron la edad de oro de los pigmentos y tintes. Surgió una industria completamente nueva, creció increíblemente rápido y se racionalizó [3].

2.2 Principales aplicaciones de los pigmentos

Las áreas de mayor importancia en el uso de pigmentos son pinturas, barnices, plásticos,

colores para artistas, tintas para impresión en papeles y textiles, decoración de cueros, materiales para construcción (cemento, bloques y tejas de hormigón, principalmente basadas en óxido de hierro y pigmentos de óxido de cromo), imitación de cuero, recubrimientos para pisos, goma, papel, cosméticos, barnices para cerámicas y esmaltes. La industria de la pintura usa pigmentos de alta calidad casi con exclusividad. Un óptimo tamaño de partícula uniforme es importante porque

Tabla 3 Clasificación de pigmentos inorgánicos coloreados.

Fuente: Traducido de Hempelmann, U., Krefeld, L., Völz, H., Ed. Buxbaum, G.; Pfaff, G. Industrial Inorganic Pigments, 2005. WILEY-VCH. Verlag GmbH&Co. KGaA.

Clase química	Verde	Azul-verde	Azul	Violeta	Rojo	Naranja	Amarillo	Marrón
Óxidos e hidróxidos de óxidos.								
Pigmentos de óxido de hierro					Óxido de hierro rojo	Óxido de hierro naranja	Óxido de hierro amarillo	Óxido de hierro marrón
Pigmentos de óxido de cromo	Óxido de cromo	óxido de cromo hidrato verde						
Pigmentos de óxido de metal mixto		Verde cobalto y azul				Naranja rutilo cromo	Níquel amarillo rutilo, cromo amarillo rutilo	Espinela de zinc-hierro, Mn-Fe marrón
pigmentos de sulfuro y sulfoselenuro					sulfoselenuro de cadmio sulfuro de cerio	sulfuro de cadmio (Cd, Zn)S		
Pigmentos de cromato	Verde cromo	Rojo de molibdato	Naranja cromo	Amarillo cromo, amarillo zinc				
Pigmentos ultramar	Rojo, violeta, azul y verde ultramar							
Pigmentos de hierro azul			Hierro azul					
Otros			Azul manganeso	Violeta cobalto manganeso			Amarillo Nápoles, vanadato de bismuto	

Término	Definición	Clase	Pigmento	Alto rendimiento
Pigmentos Blancos	El efecto visual es causado por dispersión de la luz no selectiva (por ejemplo: pigmentos de dióxido de titanio y sulfuro de zinc, litopona, blanco de zinc).	Elementos	Negro carbón	+
			Copos de Al	+
			Polvo de Zn	
Pigmentos coloreados	Pigmentos coloreados: el efecto óptico es causado por la absorción selectiva de la luz y también en gran medida por la dispersión selectiva de la luz (ejemplos: óxido de hierro rojo y amarillo, pigmentos de cadmio, pigmentos ultramarinos, amarillo cromo, azul cobalto).	Óxidos/hidróxidos	Silicio a nanoescala	#
			Ti O ₂	
			Fe ₂ O ₃	
Pigmentos negros	El efecto visual es causado por dispersión de la luz no selectiva (ejemplos: pigmento negro de humo, negro de óxido de hierro).		FeOOH	
			Fe ₃ O ₄	
			Cr ₃ O ₃	
Pigmentos de efecto	El efecto óptico es causado por una reflexión regular o interferencia.		Pb ₃ O ₄	
Pigmentos de efecto metálico	Reflexión regular sobre partículas de pigmento metálico principalmente planas y paralelas (ejemplo: escamas de aluminio).	Óxidos metálicos mixtos	Zn Fe ₂ O ₄	
			Co Al ₃ O ₄	
			(Co, Ni, Zn) ₂ TiO ₄	+
Pigmentos de brillo perlado	Reflexión regular sobre plaquetas de pigmento paralelo altamente refractivas (ejemplo: dióxido de titanio en mica).		Ti(Ni, Nb)O ₂	+
			Ti(Cr, Nb)O ₂	+
Pigmentos de interferencia	El efecto óptico de los pigmentos de brillo coloreado es causado total o principalmente por el fenómeno de la interferencia (ejemplo: óxido de hierro en la mica).	Sulfuros	Zn S	
Pigmentos luminiscentes	El efecto óptico es causado por la capacidad de absorber la radiación y emitirla como luz de una longitud de onda más larga.		Zn S/BaSO ₄ (lithopone)	
			CdS	+
			(Cd/Hg) (S,Se)	
Pigmentos fluorescentes	la luz de onda más larga se emite después de la excitación sin demora (ejemplo: sulfuro de zinc dopado con plata)		Ce S ₂	+
Pigmentos fosforescentes	la luz de onda más larga se emite varias horas después de la excitación (ejemplo: sulfuro de zinc dopado con cobre)	Óxido / nitruro	(Ca, La)Ta(O, N) ₃	#
		Cromatos	Pb(Cr, S)O ₄	
			Pb(Cr, Mo, S)O ₄	
		Vanadatos	Bi VO ₃	+
		Silicatos	Na ₃ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ S ₃ (ultramarine)	
			Pigmentos basados en mica	+
		Cianuros	KFe[Fe(CN) ₆]	

Tabla 4 Clasificación de pigmentos inorgánicos
Fuente: Traducido de Hempelmann, U., Krefeld, L., Völz, H., Ed. Buxbaum, G.; Pfaff, G. 2005. Industrial inorganic pigments, WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA.

Tabla 5 Pigmentos inorgánicos clasificados por composición. Fuente: Traducido de Buxbaum, G.; Ed. Smith, H. 2002. High performance pigments. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA.

Nota: # Aún no disponible a escala industrial

influencia el brillo, poder cubritivo, potencia de tinta, y poder iluminador. Las capas de pintura no pueden tener demasiado espesor; por lo tanto son necesarios los pigmentos con buen poder colorante y poder cubritivo combinados con óptimas propiedades de dispersión. Los pigmentos blancos se utilizan, no sólo para colorear y cubrir con blanco, sino para aumentar la luminosidad en pigmentos negros y de color. Estos deben tener un mínimo de tono de color intrínseco.

Las principales propiedades a considerar, al seleccionar un pigmento para una determinada aplicación, son las propiedades colorantes, por ejemplo poder colorante, o poder cubritivo. Estas serán las que determinen la eficiencia de un determinado pigmento para la aplicación en cuestión.

Otras propiedades a considerar son propiedades físicas y químicas generales, por ejemplo, composición química, humedad y contenido de sal, contenido de materia soluble en agua y soluble en ácido, tamaño de partícula, densidad, y dureza. Asimismo las propiedades de estabilidad deben ser consideradas, como por ejemplo, resistencia a la luz, a las inclemencias del tiempo, al calor, a los químicos, propiedades anticorrosivas, retención de brillo [2].

2.3 Clasificación

Los pigmentos pueden clasificarse de acuerdo a una serie de criterios, los más utilizados son:

- orgánicos e inorgánicos, en base a su composición química, Tablas 2y3.

- naturales o sintéticos, de acuerdo a su origen; los pigmentos sintéticos son los que mueven mayor cantidad de recursos económicos y por lo tanto los más estudiados [2].

En la tabla 4 se puede ver la clasificación de pigmentos inorgánicos, siguiendo los criterios de las normas ISO y DIN, basada en consideraciones de color y químicas [2].

Un pigmento que puede ser orgánico o inorgánico se define como un polvo fino y seco o una suspensión o suspensión acuosa del polvo, inerte para los ingredientes del hormigón y destinado a impartir un color específico al producto, [5 apud 4]. Los pigmentos naturales no se usan a menudo en el hormigón debido a su bajo poder colorante y sus colores poco saturados causados por el efecto de enmascaramiento de las impurezas y una amplia gama de tamaños de partículas dentro del mismo pigmento, [6 apud 4].

Los pigmentos utilizados para la producción de hormigón coloreado deben ser completamente alcalinos, resistentes a la luz y a las inclemencias del tiempo, y deben tener un poder colorante razonablemente alto; deben ser tan solubles en agua como los agregados, y deben estar incrustados de manera inamovible con los finos en el cemento mientras se endurece, [4].

Las partículas de pigmento son mucho más finas que las partículas de cemento, generalmente tienen diámetro menor a 1µm, siendo aproximadamente 10 veces más pequeñas que las partículas de cemento; es debido a esta razón que tienen un fuerte efecto de enmascaramiento sobre el color del cemento. Estas partículas finas no se obtienen simplemente mediante la molienda de partículas más gruesas, sino que se producen durante la fabricación. El tamaño de las partículas producidas depende del tiempo de reacción, cuanto más largo es, más grande es la partícula producida [5 y 6 apud 4].

2.4 Nuevos desarrollos

Uno de los problemas con los pigmentos inorgánicos de alto rendimiento es la química disponible, por lo que se han desarrollado muy pocos compuestos realmente nuevos en las últimas décadas.

En el lado más experimental, el “silicio a nanoescala”, con un tamaño de partícula inferior a cinco nanómetros, ahora está disponible como una curiosidad de laboratorio en cantidades de microgramos como el primero en la serie de “pigmentos de efecto cuántico” predicho por los

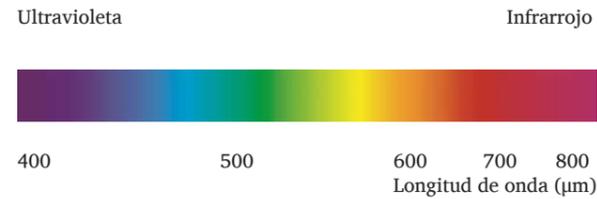


Figura 1 Espectro de radiación visible
Fuente: Adaptado de A guide to understanding color. X-Rite Pantone. https://www.xrite.com/-/media/xrite/files/whitepaper_pdfs/110-001_a_guide_to_understanding_color_communication/110-001_understand_color_en.pdf

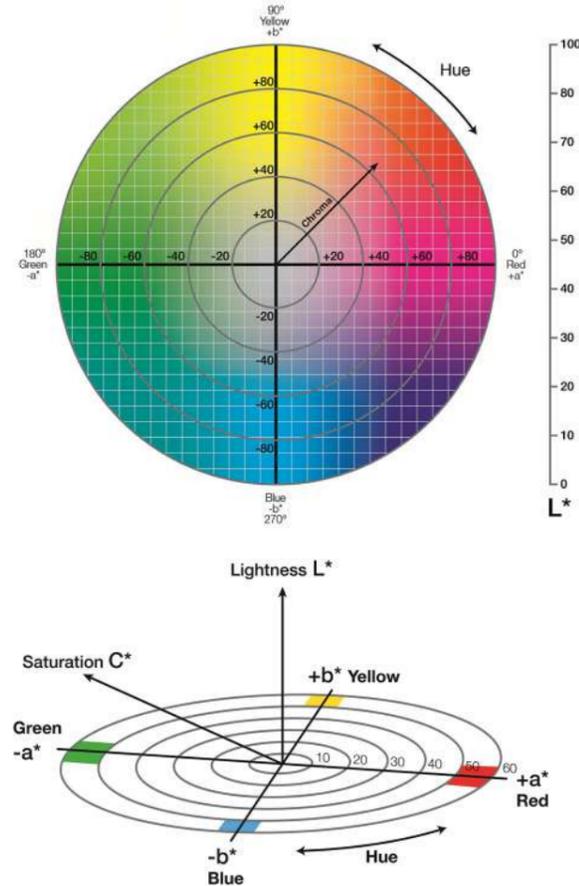


Figura 2 Representación gráfica del sistema de coordenadas CIE LAB.
Fuente: A guide to understanding color. X-Rite Pantone. https://www.xrite.com/-/media/xrite/files/whitepaper_pdfs/110-001_a_guide_to_understanding_color_communication/110-001_understand_color_en.pdf

físicos teóricos, [7]. Más cerca de la introducción hay otra nueva familia, el calcio lanathanum, óxido de tantalio-nitruros. Sin embargo, primero debe probarse la reproducibilidad. Sus propiedades publicadas, a saber, el brillo del color junto con la no toxicidad parecen ideales para incluirse en la categoría de alto rendimiento, [7].

Un estudio del pigmento azul ultramarino, también podría ser significativo a la luz de su resurgimiento a través de la nueva tecnología de fabricación recientemente introducida. Y, por lo tanto, es posible que, en el futuro, el desarrollo de nuevos procesos de fabricación de pigmentos viejos y la mejora de sus propiedades puedan revitalizar estos productos hasta el punto en que también puedan unirse a las filas de pigmentos de alto rendimiento como los que se aprecian en la Tabla 5 [7].

Actualmente los requerimientos de la industria están enfocados, además de obtener pigmentos eficientes desde el punto de vista colorimétrico y económico, en reducir la toxicidad. Esto implica reducir la contaminación, con pigmentos ecológicos aceptables desde el punto de vista ambiental. Estas serán las principales demandas de la industria para los próximos años, [7].

3. Color

3.1 Definición de color

Para que se produzca la percepción del color, es necesaria la presencia de tres factores, un objeto reflejante, la radiación incidente y el receptor u observador que percibe el fenómeno. De acuerdo a Artigas et al. [8], el color es un atributo de la percepción visual y esto es posible gracias a que

el sistema visual es capaz de detectar y analizar las radiaciones correspondientes a una pequeña región del espectro electromagnético (Figura1). Si esto no fuera posible, no podríamos percibir los colores. De esta forma el sistema visual realiza un análisis espectral en tiempo real de la luz que recibe. Para la óptica, el color es sólo una radiación electromagnética al igual que la luz, y para su rama aplicada la colorimetría será una mezcla de al menos tres componentes, que pueden representarse por coordenadas espaciales según los diversos sistemas de ordenación del color. Esta particularidad denominada trivariancia ha permitido el desarrollo de colorímetros visuales, y es el fundamento de esa ciencia aplicada [9].

3.2 Medición de color

Sistema CIE L*a*b*

El sistema desarrollado por la Commission Internationale de L'Eclairage (CIE), el sistema CIE L*a*b*, abreviado CIELAB, reconocido y utilizado en todo el mundo, tiene muchas ventajas sobre los sistemas de atlas anteriores [Caivano, J. 1995. Sistemas de orden del color. Serie difusión 12. Secretaría de investigaciones en ciencia y técnica. Fadu. Universidad de Buenos Aires]. El sistema CIELAB es un sistema de coordenadas en tres dimensiones, con sus tres ejes perpendiculares entre sí. Los mismos son, el eje a * rojo-verde, el eje b * azul-amarillo y el tercer eje vertical L * = 0 (negro) a L * = 100 (blanco). Todos los colores se pueden clasificar utilizando este sistema que se puede graficar como se muestra en la Figura 2.

En el sistema CIELAB, distancias geoméricamente iguales en todos los sectores de color corresponden más o menos a diferencias percibidas visualmente, razón por la cual el sistema también se conoce como un sistema casi naturalmente sensible. En el mismo se pueden representar aproximadamente la magnitud percibida de las diferencias de color entre estímulos de color de objetos del mismo tamaño y forma, vistos en entornos idénticos de blanco a gris medio, en condiciones de iluminación correspondientes a las de la luz del día promedio [11].

Las diferencias de color entre dos muestras, obtenidas mediante colorímetro o espectrofotómetro, (indicadas por los subíndices 0 y 1) se calcularán de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Diferencia de luminosidad CIELAB: } \Delta L^* &= L^*1 - L^*0 \\ \text{Diferencia en el eje rojo-verde: } \Delta a^* &= a^*1 - a^*0 \\ \text{Diferencia en el eje amarillo-azul: } \Delta b^* &= b^*1 - b^*0 \end{aligned}$$

ΔL^* es la diferencia entre L* de la muestra de referencia y L* de la muestra ensayada
 Δa^* es la diferencia entre a* de la muestra de referencia y a* de la muestra ensayada
 Δb^* es la diferencia entre b* de la muestra de referencia y b* de la muestra ensayada

$$\begin{aligned} \text{Diferencia de cromaticidad CIELAB: } \Delta C^*_{ab} &= C^*_{ab.1} - C^*_{ab.0} \\ \text{Diferencias de ángulo de tono CIELAB: } \Delta h^*_{ab} &= h^*_{ab.1} - h^*_{ab.0} \end{aligned}$$

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

Esta fórmula se conoce como CIE 1976, donde la diferencia de color se calcula como la distancia vectorial entre dos puntos ubicados en el espacio, el que se considera aproximadamente uniforme. En la práctica industrial, se producen pequeñas diferencias de color, lo que ha mostrado efectos no uniformes. Además, un cambio en las condiciones de observación externa puede cambiar la magnitud percibida de la diferencia de color entre un par de muestras. Es por esto que se continúan realizando desarrollos en la medición, llegando a la fórmula CIEDE2000.

Esta nueva fórmula corrige la falta de uniformidad del espacio de color CIELAB para pequeñas diferencias de color. Las mejoras en el cálculo de la diferencia de color total se aplican para los efectos que dependen de la luminosidad, de la cromaticidad, del tono y la interacción tonocromaticidad sobre la diferencia de color percibida. La escala a lo largo del eje a * se modifica para corregir una no uniformidad observada con colores grises. La ecuación resultante es la siguiente:

$$\Delta E^*_{00} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2 + (\Delta H^*)^2 + R_T (\Delta C^*) + (\Delta H^*)^2]^{1/2}$$

$$K_L S_L \quad K_C S_C \quad K_H S_H \quad K_C S_C \quad K_H S_H$$

4. Estabilidad del color

Lynsdale y Cabrera [4] proponen que para estudiar la estabilidad del color del hormigón, se debe considerar el sistema de pigmento - hormigón en su totalidad. Los principales factores que afectan la estabilidad del color del hormigón coloreado son la calidad del hormigón y las condiciones a las que el hormigón está expuesto. En esta misma dirección Mailvaganam [12], menciona las condiciones de exposición como el primer factor a considerar de entre los que afectan la estabilidad del color, generando un debilitamiento progresivo de la intensidad del color y una disminución del brillo. Menciona asimismo que el efecto aumenta con la edad y se observan cambios comparativamente grandes debido a la erosión de la capa de cemento de la superficie y la exposición del agregado subyacente. El nivel del deterioro depende del color del pigmento, ya que algunos son más resistentes a la intemperie que otros.

Otros factores que considera Mailvaganam [12] son los siguientes, proporciones de la mezcla, el contenido de cemento y agregado fino influirán significativamente en el grado de coloración alcanzado. La relación agua/ cemento, en general, cuanto mayor sea el contenido de agua de la mezcla, más claro será el color final. También incluye, el tipo de cemento, color del agregado, los métodos constructivos, entre ellos, el encofrado, los agentes desencofrantes, las condiciones de curado y los procedimientos de acabado, como elementos significativos a considerar.

En esa misma línea, Lynsdale y Cabrera [4] hacen hincapié en que una buena práctica de hormigonado es esencial para proporcionar la estabilidad de color deseada. Esto incluye el uso de una baja relación agua / cemento, la elección adecuada de los agregados (con respecto al color y la clasificación), la compactación efectiva y el curado adecuado. El control sobre dichos parámetros reduce la porosidad capilar, aumenta la resistencia y hace que el hormigón sea tolerante a la abrasión mecánica (en el caso de bloques de pavimentación de colores) y la acción de congelación y descongelación. La floración de

cal y los depósitos de carbonato de calcio en las superficies del hormigón se reducen notablemente cuando se usa dicho hormigón.

A este respecto, Positieri [13] verifica en cuanto a la medición de eflorescencias un aumento de la luminosidad en función del tiempo de envejecimiento acelerado. Dichos incrementos presentan diferentes magnitudes para cada color, siendo notablemente mayores en el color negro. Esas eflorescencias fueron determinadas y evaluadas en el tiempo a partir de las mediciones de las coordenadas cromáticas, determinándose el coeficiente de variación y la desviación standard.

Asimismo en cuanto a los ensayos de aceleración de las condiciones externas Lynsdale y Cabrera [4] analizan que es preferible que las muestras efectivamente sean expuestas a condiciones reales, ya que es posible evaluar mejor su comportamiento. A su vez, mencionan algunos de los ensayos que es posible realizar en laboratorio a los efectos de poder evaluar las mismas en menores tiempos, por ejemplo: un medidor de condiciones externas (weatherometer), o el test kester nich que simula una atmósfera industrial de dióxido de sulfuro, y dióxido de carbono. Sin embargo, comentan que, algunos autores [15, 16] no han encontrado una correlación entre los datos obtenidos mediante los ensayos en condiciones reales y aceleradas, por lo que no consideran que estos últimos sean válidos.

5. Efectos de los pigmentos sobre las propiedades del hormigón

5.1 Propiedades en estado fresco

5.1.1 Trabajabilidad

La adición de pigmento a la masa del hormigón no afecta la consistencia ni la trabajabilidad de la masa del mismo, en forma significativa, en la medida que el porcentaje de pigmento no sobrepase el 6%. Las dosis más altas aumentan la demanda de agua y la rigidez prematura de la mezcla, particularmente cuando se usan pigmentos sintéticos que contienen partículas muy finas [12].

En la misma línea, la norma norteamericana [14] establece que la relación agua-cemento no debe ser superior al 110% que la de la mezcla control, (para asegurar la resistencia a compresión de 28 días no sea inferior al 90%). Asimismo Mailvaganam [12] menciona que una gran superficie específica de negro de humo tiene una influencia marcada en la consistencia; pudiendo ocurrir una reacción física o coloidal que aumenta la velocidad de endurecimiento de la mezcla.

En el caso del hormigón autocompactante (HAC), de acuerdo a López et al. [17] la incorporación de pigmentos modifica el comportamiento en estado fresco de las pastas y los morteros y, en consecuencia, de los SCC. Los estudios sobre pastas son útiles para predecir esos efectos y son consistentes con el comportamiento de los morteros. Las mediciones reológicas confirmaron las tendencias encontradas mediante pruebas de ingeniería, con buena correlación entre ellas. Al incorporar pigmentos en la masa de hormigón, se producen cambios en la trabajabilidad de la misma; los pigmentos aumentaron la cohesión de los morteros. En el caso del pigmento amarillo, el aumento en el límite de elasticidad de la masa, podría producir una mayor resistencia al flujo.

5.1.2 Colocación y tiempos de fraguado

La mayoría de los pigmentos y aditivos multicomponentes para dar color, cuando se usan en los niveles de adición recomendados, no alteran los tiempos de colocación. Sin embargo, el negro de humo y ciertos óxidos de hierro pueden producir un endurecimiento prematuro [12].

De acuerdo a lo que establecen las normas [14] y [18], al agregar un pigmento a una mezcla de hormigón en la dosis máxima prescrita, no debe acelerar el tiempo de fraguado inicial en más de 1 h. En cuanto al tiempo de fraguado final, la norma norteamericana [14] establece que no se debe retardar en más de 11/2 h, y la norma inglesa [18] establece que no debe ser mayor a 12 h. La diferencia máxima entre el tiempo de fraguado final de las mezclas con y sin el pigmento único

o una mezcla (tanto como polvo, granulado o preparación) no debe ser superior a 2 h.

5.1.3 Contenido de aire

Algunos pigmentos pueden alterar el % de aire ocluido en la masa. Según [19 apud 12], ciertos pigmentos pueden aumentar considerablemente la incorporación de aire en el hormigón fresco, como en el caso de las ftalocianinas cúpricas. Esto fue confirmado por López et al. [20], donde pudieron observar un aumento significativo en el contenido de aire al usar dichos pigmentos.

La norma norteamericana [14] establece que, cuando se agregan pigmentos en una mezcla de hormigón a la dosis máxima prescrita, los mismos no deben cambiar el contenido de aire en más del 1.0%, en comparación con la mezcla de control incolora cuando se prueba de acuerdo con el procedimiento de preparación de la mezcla establecido en la norma. Un aumento en el porcentaje de aire ocluido en el hormigón lleva a esperar importantes reducciones en la resistencia del mismo [20].

Otros pigmentos pueden reducir la cantidad de aire atrapado como es el caso de negro de humo u otros pigmentos de área superficial muy alta. En el caso de resistencia a la congelación esto puede ser perjudicial, por este motivo la mayoría de los pigmentos de negro de humo actualmente comercializados contienen agentes incorporadores de aire [12]. A este respecto la norma inglesa [18] dice que los pigmentos negro de humo no deben superar el 2,0% de sólidos, en peso, en tanto los pigmentos inorgánicos será del 5%.

5.1.4 Exudación y asentamiento

Los pigmentos y los adyuvantes de colorante del mortero que se usan en dosis permitidas no alteran las características de exudación de una mezcla. Las mezclas para colorear multicomponentes y las dispersiones de pigmentos, cuando se usan en dosis más altas que las recomendadas o con cementos de bajo contenido de C3A, pueden reducir la cohesión de la mezcla y promover la

exudación [12]. En este sentido las normas [18] y [14] no hacen precisiones al respecto.

5.2 Propiedades del hormigón en estado endurecido

5.2.1 Resistencia a la compresión

Ya hacia 1927 se había detectado que ciertos pigmentos producto de su actividad puzolánica producían un aumento en la resistencia del hormigón, [21 apud 12], menciona que los pigmentos de óxido de hierro (cuando se agregan en exceso del 10%) y el azul ultramar pueden producir hormigón de alta resistencia a la compresión. El efecto se ha atribuido a una disminución de la relación A/C efectiva con la primera y a una actividad puzolánica debida a la mezcla en la última. Los valores de resistencia a la abrasión se ven afectados de manera similar.

Es así que Positieri [13] en su tesis doctoral, concluyó que para la edad de ensayo de 28 días, los hormigones con pigmento negro y amarillo presentan resistencia a compresión mayores que el de referencia sin pigmento; para el amarillo el incremento con respecto al de referencia es como máximo del orden del 20 %. A la edad de 91 días el hormigón con pigmento amarillo presenta resistencia a compresión mayor que el gris, y a la edad de ensayo de 182 días, la resistencia a compresión de los hormigones con pigmento negro y amarillo supera los valores obtenidos para los hormigones de referencia grises. El hormigón con pigmento amarillo siempre presenta mayor resistencia a compresión que el de referencia sin pigmento.

En febrero del año 2002, se obtuvo una resistencia record en cuanto a hormigones coloreados se refiere, diseñado para la E-Tower (Hartmann & Helene) en la villa olímpica San Pablo, se obtuvieron resistencias a la compresión del orden de 125 MP. Se trata de un hormigón de alto desempeño, en el que se utilizaron pigmentos de óxido ferroso. Este hormigón de alto desempeño, además del éxito en relación a su resistencia a compresión posteriormente fue también comprobada su eficiencia en relación a la resistencia al fuego.

De acuerdo a Mailvaganam [12] los valores de resistencia no se ven afectados negativamente a tasas de adición inferiores al 6% para la mayoría de los pigmentos sintéticos y naturales inorgánicos.

Sin embargo se ha reportado que algunos pigmentos contribuyen a bajar la resistencia en relación a las mezclas de referencia. Los pigmentos orgánicos, como la ftalocianina y el negro de humo, que contienen partículas muy finas, están limitados a niveles de dosificación por debajo del 3% debido a los efectos drásticos que tienen sobre el requerimiento de agua y, en consecuencia, sobre las resistencias a la compresión y la tracción [12].

Asimismo Positieri [13] registró que a los 28 días el hormigón con pigmento rojo presenta una leve disminución de la resistencia a compresión, del orden de 7 % como máximo. A los 91 días los hormigones con pigmento negro y rojo presentan resistencias a compresión menores que el gris. A la edad de 182 días el rojo tiene menor resistencia que los pigmentos amarillo y negro. El hormigón con pigmento rojo presenta, para todas las edades, menor resistencia a compresión que el de referencia.

En este sentido las normas [18] y [14] requieren que las resistencias medias a la compresión del hormigón que contiene el pigmento no difieran en más del 10% y 20%, respectivamente, de las resistencias medias a la compresión que la mezcla sin pigmento y como se mencionó anteriormente la norma [14] establece que la relación agua-cemento no debe ser superior al 110% que la de la mezcla control, para asegurar la resistencia a compresión de 28 días no sea inferior al 90%.

5.2.2 Contracción de secado

Lynsdale y Cabrera [4], citando a Mowat y Simmons [22] menciona que la contracción del hormigón coloreado que contiene pigmentos de óxido de hierro negro o marrón es mayor que la del hormigón de control que tiene la misma consistencia. La contracción aumenta con el nivel de dosificación del pigmento debido a la mayor demanda de agua. También hacen referencia a

un estudio de Kroone y Blakey [23], en el que la relación agua/cemento se mantuvo constante, y se encontró que la contracción de las mezclas pigmentadas con negro de humo, magenta o ultramar es mayor que la de las mezclas sin pigmentar de 15% a 30%.

Sin embargo, ambos investigadores concluyen que las variaciones son demasiado pequeñas para ser motivo de preocupación. A su vez mencionan que Levitt sugirió que si se usa un repelente de agua en la mezcla pigmentada, se reducirá la contracción por secado, aunque no se informaron datos reales.

5.2.3 Durabilidad, (y/o mantenimiento del color)

5.2.3a Resistencia al congelamiento

Como se mencionó previamente respecto a la cantidad de aire ocluido, el pigmento negro de humo u otros pigmentos de área superficial muy alta, pueden reducir la cantidad de aire en la masa. En el caso de resistencia a la congelación esto puede ser perjudicial, por este motivo la mayoría de los pigmentos de negro de humo actualmente comercializados contienen agentes incorporadores de aire [Mailvaganam [12] citando a Taylor, T. [19].

5.2.3b Permeabilidad

En el caso de Positieri [13], se observó que la presencia de los pigmentos resulta favorable o tiene poca influencia en esta propiedad respecto a los hormigones de referencia. Mailvaganam [12] registra que el uso de altas dosis de materiales con un área de superficie alta o la adición de grandes cantidades de dispersiones de pigmentos producen hormigón con una alta relación A/C. La permeabilidad de dicho hormigón se reducirá en consecuencia.

5.2.3c Succión capilar

En la investigación de Positieri [13], los resultados muestran que a la edad de ensayo de 28 días el comportamiento de los hormigones de referencia y pigmentados es similar respecto a la succión

capilar, mientras que a los 91 días, los hormigones pigmentados presentan menor succión capilar que los de referencia, manteniéndose esta tendencia a la edad de 182 días.

5.2.3d Absorción e índice de vacíos

Positieri [13] registra que los hormigones pigmentados presentan, para todos los grupos, menor absorción por inmersión que el hormigón de referencia, probablemente por un refinamiento de la estructura de poros. Con respecto al índice de vacíos, los hormigones coloreados presentan menor índice de vacíos, que los hormigones de referencia. Resulta de interés la influencia de los pigmentos en el índice de vacíos ya que se incrementa para todos los hormigones según aumenta la relación agua/cemento, en menor proporción para los hormigones pigmentados, debido al efecto filler que ejerce el pigmento.

6. Consideraciones prácticas

De acuerdo a Lynsdale y Cabrera [4], es conveniente tener en cuenta una serie de consideraciones al momento de llevar adelante los procedimientos constructivos, con el propósito de obtener los mejores resultados, las mismas se detallan a continuación:

- 1- El encofrado debe ser de buena calidad y acabado, y no debe contener espacios donde el agua pueda filtrarse.
- 2- Los agentes desmoldantes deben ser agua en cremas en emulsión o agentes químicos de liberación, a los efectos de no influir en el color.
- 3 – El curado debe ser eficiente y uniforme lo cual es importante para mantener un color uniforme. El uso de membranas de curado es útil. Sin embargo, cubrir el hormigón con bolsas de polietileno no se recomienda, ya que promueve la condensación y la tinción, citando a Levill [24].
- 4- Para lograr una combinación de colores adecuada, se debe moldear un panel de prueba de tamaño suficiente con el mismo tipo de cemento y

agregados que se usarán en el trabajo. El encofrado debe incluir todas las variables que pueden ocurrir en el trabajo, es decir, profundidad, refuerzo, tipo de encofrado, desencofrante, etc., citando a Levill [24] y Dovney [25].

5- Cuando se requieren colores pálidos, es difícil dispersar una pequeña cantidad de un pigmento con un fuerte poder de teñido en la mezcla de manera homogénea. Es más conveniente usar una mayor cantidad de pigmento con un menor poder de teñido, citando a BS [18].

6.1 Cómo colocar el pigmento

Lynsdale y Cabrera [4], mencionan, citando a Stadlmuller et al [26] que en general, hay cuatro formas de agregar el pigmento a la mezcla: agregar el pigmento seco por volumen, agregar el pigmento seco por peso, agregar la suspensión de pigmento por volumen y agregar la suspensión de pigmento por peso.

Todos los métodos pueden llevarse a cabo de forma manual o utilizando dispensadores automáticos. Este último proporciona una mayor fiabilidad, consistencia en el color y rentabilidad. No se recomienda medir el pigmento seco por volumen, ya que la densidad del pigmento puede variar dependiendo de su nivel de compactación en su recipiente. Citando a los mismos autores, también mencionan que cuando se usa una suspensión de pigmento, se da preferencia a la medición volumétrica. Se ha encontrado que las suspensiones de pigmentos se pueden medir de forma muy sencilla y precisa con la ayuda de un cilindro de dosificación.

7. Consideraciones Finales

La incorporación de pigmentos coloreados al hormigón ha revitalizado un material usado largamente en la industria de la construcción. Esta renovación se debe a razones estéticas, lo que brinda nuevas posibilidades de aplicación por la capacidad de una mayor aceptación del material entre los usuarios. A este valor, se agregan las nuevas capacidades de ciertos pigmentos

de la colaboración en elementos estructurales aumentando resistencia de los mismos.

La industria química, deberá seguir trabajando en función de los requerimientos y mayores exigencias respecto a generar pigmentos más eficientes desde el punto de vista colorimétrico. Generar mayor diversidad de colores, más saturados y atractivos, que tengan mayor estabilidad y durabilidad en el tiempo. Así como también generar pigmentos más inocuos para la salud, reduciendo su toxicidad y más amigables con el medio ambiente.

La incorporación de pigmentos en el hormigón implica el conocer cómo se comporta el material con esta adición, algo en lo que aún hay que seguir trabajando. Si bien hay investigaciones que brindan elementos para la aplicación práctica, es importante seguir trabajando para tener un conocimiento profundo sobre su comportamiento para su aplicación en obra y posterior mantenimiento en el tiempo. La bibliografía consultada plantea, como en el caso de otros tipos de hormigones especiales, que la buena práctica en la confección del material es fundamental para obtener una buena calidad de producto final, y por lo tanto lograr mejores resultados. Esto conlleva, la elección de materiales de calidad y adecuados a la aplicación, el control de los parámetros involucrados, lo que se concreta en una buena práctica de hormigonado.

Referencias

- [1] European Standard EN 971-1_1996 Paints and varnishes - Terms and definitions for coating materials-Part 1: general terms.
- [2] Hempelmann, U., Krefeld, L., Völz, H., Ed. Buxbaum, G.; Pfaff, G. 2005. Industrial inorganic pigments. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA.
- [3] Abel, A. 2012 The history of dyes and pigments: From natural dyes to high performance pigments. Colour Design art.24. Elsevier Ltd.
- [4] Lynsdale, C., Cabrera, J. 1989. Coloured concrete. A state of art review. Concrete vol 23, nr 7 (aug), 29-34.

- [5] Levitt, M. 1980. Pigments. Concrete international. The Construction Press 96-102.
- [6] Koxholt, P. 1985. Iron oxide pigments-the largest colour. Ind Miner London suppl (May) 22-25.
- [7] Buxbaum, G.; Ed. Smith, H. 2002. High performance pigments. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA.
- [8] Artigas, J., Pujol, J. 1995 Óptica fisiológica. Psicofísica de la visión. S.A. MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA.
- [9] AADL. Asociación Argentina de Luminotecnia Iluminación. Luz, visión, comunicación. 2001. AADL.
- [10] Teichmann, G. 1990. The use of colorimetric methods in the concrete industry. Betonwerk und Fertigteil-Technik 11, 58-73.
- [11] CIE 15:2004. Colorimetry. Comission Internationale de L'Eclerage 3rd Edition.
- [12] Mailvaganam, N. Ed. Ramacharan, V. 1995. Concrete admixtures handbook. Noyes Publications.
- [13] Positieri, M. 2005. "Propiedades fisicomecánicas y durabilidad del hormigón coloreado" Ph.D. thesis, Universidad Nacional de Córdoba.
- [14] ASTM 979. 1999. Standard Specification for Pigments for Integrally Colored Concrete. American Society for Testing and Materials.
- [15] Von Szadkowski, G., Uerdingen, K. 1987. The wheathering behaviour of pigmented concrete paving blocks. Beton und Fertig-Technik, vol53, no1(April) 15-18.
- [16] Kresse, P., Uerdingen, K. 1982. Colour changes during the weathering of pigmented concrete. Beton und Fertig-Technik, vol 48, no 8 475-484.
- [17] López, A., Tobes, J., Torrijos, M., Barragán, B., Giaccio, G., Zerbino, R. 2007. Effect of pigments on the rheological properties of mortars for self-compacting concrete. Proceeding of the 5th International RIELM Symposium on Self-Compacting Concrete. Ghent, Belgium.
- [18] BSEN 12878_2014. Pigments for the colouring of building materials based on cement and/or lime - Specifications and methods of test. British Standard Publication.
- [19] Taylor, T. 1974. Effect of Carbon Black Iron Oxide on the Air Content and Durability of Concrete, Proceedings A. C.I. 44:6 13-624.
- [20] López, A., Tobes, J., Giaccio, G., Zerbino, R. 2009. Advantages of mortars based design for colored concrete. Cement & Concrete Composites 31, 754-761.
- [21] Wilson, R., 1927. Test of Colors for Portland Cement Mortars, Proceedings A.C.I., 23:226-252.
- [22] Mowat, G., Simmons, M. 1988. Coloured concrete for architectural use. Institution of Engineering, Australia, Civil Engineering Transactions, vol 24, o2 162-170.
- [23] Kroone, B., Blakey, F. 1968. Some aspects of pigmented concrete. Construction Review, (July) 25-28.
- [24] Levitt, M. 1980. Pigments. Concrete International, The Construction Press 96-102.
- [25] Dovney, C. 1976. Comparisons of concrete colour methods. Concrete Construction, vol 21, no 5, 201-7, 209-10.
- [26] Stadlmuller, H., Teichmann, G., Uerdingen, K. 1983. The dosage of iron oxide pigments in the production of coloured concrete products, Beton und Fertigteil-Technik, (Jan) vol 49, no 1, pp 22-30.
- [27] Lozano, D. 1978. El color y su medición. Editorial AmericaLee.

Hormigón autocurado uso de agentes naturales o químicos

Gerardo Nicolás Sosa López¹

1. e-mail: arq.nicolas.sosa@gmail.com

Palabras clave: hormigón auto-curado, polímero glycol, piedra pómez, leca.

Resumen: El hormigón auto-curado es un tipo de hormigón con el cual se reduce la retracción autógena, responsable de la fisuración a edades tempranas del hormigón. Se utiliza en edificios de gran altura, puentes y también en lugares donde el acceso para un correcto curado se hace dificultoso, ya sea por motivo de la ubicación de esas piezas de hormigón o por las altas temperaturas en las cuales vamos a hormigonar esas piezas. En este trabajo se desarrollarán las ventajas y desventajas del uso de dos tipos de agentes de auto-curado, los agregados de bajo peso y los polímeros súper-absorbentes.

Key words: self-curing concrete, light weight aggregate, super-absorbent polymer, leca.

Abstract: The self-curing concrete is a kind of concrete which reduced autogene deformation, responsible of early ages microcracking of concrete. It is used mainly in tall buildings, bridges and also in places where access for a correct cure its difficult, either for the location of those concrete pieces or for the high temperatures in which we are going to do the concrete. In this work they will develop advantages and disadvantages of using dos kinds of self cure agents, the light weight aggregates o the superabsorbent polymers.

1. Introducción

En las últimas dos décadas el avance en la tecnología del hormigón ha sido muy rápido, apuntado a mejorar las propiedades del hormigón. Uno de esos avances se dio en la búsqueda de Hormigones de Alto Desempeño (HAD) y Hormigones de Alta Resistencia (HAR), donde han encontrado aplicación en edificios altos, túneles, puentes y más. Ambos tipos de hormigones se caracterizan por utilizar bajas relaciones agua/cemento (a/c) 0.2-0.45, por lo que hay que prestar máxima atención a la etapa de curado.

Estudios previos reportan que el HAD proporciona aumento de la resistencia, mayor rigidez, mayor durabilidad, menores costos de mano de obra y

una efectiva resistencia al impacto. Sin embargo, el problema de la fisuración a temprana edad es un gran impedimento en el HAD. Mousa [1] plantea que las causas de la fisuración a temprana edad son los efectos térmicos y la retracción autógena. Igualmente investigadores plantean que la retracción autógena, llamada auto-deseccación es la principal causa de la fisuración a temprana edad.

Generalmente hay un suministro de agua insuficiente para una correcta hidratación del HAD como resultado de una baja relación a/c y de la presencia de aditivos como la sílice activa. Sumado a eso, la dificultad de curado en elementos verticales usando el curado

tradicional, inaccesibilidad a algunas zonas de la obra y una pobre mano de obra llama a un cambio de paradigma en la tecnología de curado del hormigón.

La tecnología innovadora en curado de hormigón, que está ganando popularidad dentro de la práctica y de la comunidad de investigadores, se llama Tecnología de Auto-Curado (SCT Self Curing Technology) o Curado Interno (CI). Como establece El-Dieb [2] estos términos son utilizados para definir al hormigón con mayor capacidad de retención de agua durante el régimen de curado. Justs [3] a su vez, define al hormigón auto-curado como “el proceso por el cual pequeñas inclusiones dispersas dentro del concreto retienen el agua durante la mezcla hasta el momento de colocación y luego la liberan durante la hidratación del cemento”. La práctica del auto-curado es un método por el cual se le proporciona una mayor cantidad de agua al hormigón para una más efectiva hidratación del cemento y de esa manera reducir la retracción autógena. Algunos de los beneficios de un curado interno serían:

- Baja permeabilidad.
- Reducción en el coeficiente de expansión térmica.
- Mejora en la zona de transición.
- Mejor hidratación y micro-estructura de la pasta de cemento.
- Aumento de la resistencia y el impacto al golpe.
- Reducción de la retracción autógena.

Actualmente existen varios agentes de auto-curado para el hormigón, Madduru [4] y Krishna and Japail [5] agruparon materiales utilizados para el autocurado del hormigón en cuatro subgrupos:

- Agregados de bajo peso.
- Polímeros súper-absorbentes.
- Aditivos reductores de la contracción.
- Polvo de madera.

En este trabajo nos enfocaremos en los agregados de bajo peso y los polímeros súper-absorbentes.

2. Agentes de Auto-curado

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se analizarán dentro de los agentes de auto-curado a los agregados de bajo peso (LWA Light Weight Agregated) y a los polímeros súper-absorbentes (SAP Súper Absorbent Polymers).

2.1 - Agregados de Bajo Peso

Los agregados de bajo peso fueron los primeros materiales en ser utilizados en la tecnología de CI, siendo Klieger, en el año 1957, uno de pioneros en su implementación.

Estos materiales tienen la capacidad de absorber una considerable cantidad de agua durante el mezclado y luego consecuentemente liberarla en la pasta de cemento durante el proceso de hidratación.

Dentro de los agregados de bajo peso encontramos dos grupos:

- Los de origen natural.
- Los de origen natural modificados mediante procesos industriales.

Dentro de los de origen natural encontramos a la piedra pómez, una roca ígnea volcánica vítrea constituida de vidrio espumoso que se forma por un rápido enfriamiento de un magma ascendente de alta viscosidad. Debido a esto, el material queda atascado en la masa, así como el vapor y los gases que contenía, dando origen a un producto muy poroso y liviano.

La piedra pómez es un compuesto de trióxido de sílice y trióxido de aluminio, que además posee los siguientes componentes: 71% de Sílice (SiO₂); 12.8% de Aluminio (Al₂O₃); 1.75% de Hierro (Fe₂O₃); 1.36% de Calcio (CaO); 3.23% de Sodio (Na₂O); 3.83% de Potasio (K₂O), 3.88% de Humedad (H₂O).

Se le llamó piedra pómez a los granos con un diámetro mayor a 4 mm, y pumicita a los de un



Piedra pómez
Fuente: Internet

diámetro menor de 4 mm. Ambos tienen una composición química muy similar.

La textura de la piedra pómez es bastante porosa y escoriácea. Es muy liviana y áspera con numerosos huecos y cavidades. De color gris, blanquecina u otros diversos tonos como verdoso rojizo o negro.

Los colores varían según las proporciones de minerales que contenga, ya sea que se trate de

cuarzo, óxido de potasio, alúmina, magnesia, bicarbonato, óxido ferroso o sílice.

En el grupo de los de origen natural modificados mediante procesos industriales se encuentra la leca que es un árido cerámico de gran ligereza que se fabrica calentando trozos de arcilla en un horno rotativo a aproximadamente 1200°C. Los gases resultantes de este proceso expanden el volumen de la pieza disminuyendo su densidad.

Experimento con leca
Fuente: Elaboración personal

Leca
Fuente: Internet



Su granulometría puede variar desde los 10-16mm, hasta diámetros inferiores a los 5mm. En general, cuanto más grande sea el tamaño del grano (más expandido), menor será la densidad del material, que oscila entre los 325kg/m³ y los 750kg/m³. Esta densidad es hasta cinco veces inferior a la de la arcilla común, en torno a los 1500kg/m³.

Se realizó un estudio de esferas de leca para visualizar como la leca funciona, las mismas se sumergieron en agua y se fue registrando cada una hora, 8 horas, 12 horas y 24 horas como variaba su peso, los resultados se detallan a continuación:

2.2 - Polímeros Súper-absorbentes

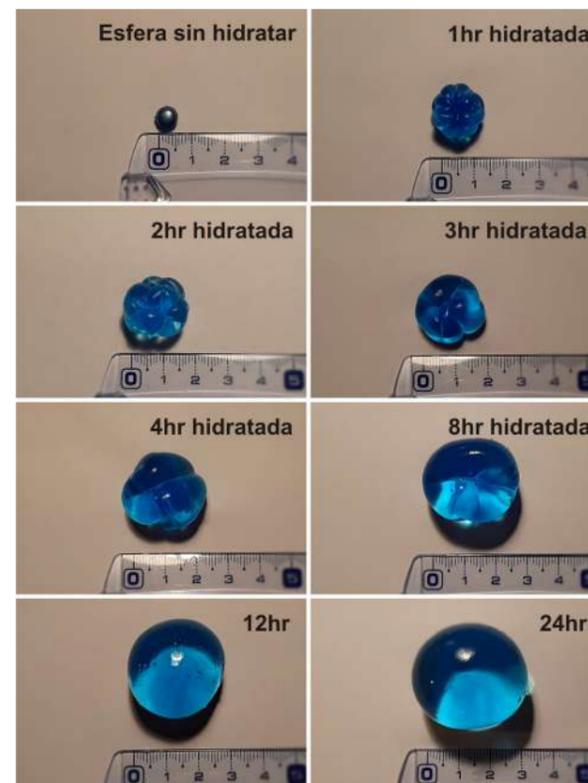
Los polímeros súper absorbentes (en inglés Súper Absorbent Polymers o SAP) son polímeros que pueden absorber y retener cantidades

extremadamente grandes de un líquido en relación a su propia masa. Los polímeros absorbentes de agua que se clasifican como hidrogeles cuando reticulan, absorben soluciones acuosas a través de enlaces de puente de hidrógeno con las moléculas de agua. La capacidad de un SAP para absorber el agua es un factor de la concentración iónica de la solución acuosa.

En agua desionizada y destilada, un SAP pueden absorber 500 veces su peso (30 a 60 veces su propio volumen) y puede llegar a ser hasta 99,9% de líquido, pero cuando se colocan en una solución salina al 0,9%, la capacidad de absorción baja a quizás 50 veces su peso.

La absorbencia total y la capacidad de hinchamiento se controlan mediante el tipo y grado de agentes de reticulación utilizados para fabricar el gel. Los SAP con baja densidad de reticulación generalmente

Experimento con hidrogel
Fuente: Elaboración personal



Policarboxilato de Sodio
Fuente: Internet



DOSIFICACIONES DE HORMIGON (Kg/m ³)							
Nro.	Ref	Cemento	Agua	Superplast.	Agente de autocurado		Arena
					Poli. de sa	Pómez	
1	ref	549	514	34	0	0	1166
2	Pomez 1	522	489	33	0	152	957
3	Pomez 2	468	439	29	0	254	741
4	SAP 0.3	548	514	34	6,85	0	1158
5	SAP 0.6	542	509	34	13,6	0	1139

Tabla 1
Fuente: [6]

tienen una mayor capacidad absorbente y se hinchan a un grado mayor. Estos tipos de SAP también tienen una formación de gel más blando y pegajoso. Los SAP con altas densidades de reticulación exhiben menor capacidad absorbente y se hinchan, pero la resistencia del gel es más firme y puede mantener la forma de las partículas, incluso bajo una presión moderada.

Se realizó un estudio de esferas de hidrogel para visualizar como un polímero súper-absorbente funciona, las mismas se sumergieron en agua y se fue registrando cada una hora, dos horas, 3 horas, 4 horas, 8 horas, 12 horas y 24 horas como variaba su tamaño, los resultados se detallan a continuación:

3. Análisis de investigación

El propósito es evaluar las ventajas y desventajas del uso de diferentes tipos y porcentajes de agentes de auto-curado en el hormigón. Focalizando en los resultados de resistencia a la compresión.

4. Experimental

Se analizaron 2 combinaciones: uno utilizando LWA de origen natural (Piedra pómez) y SPA (policarboxilato de sodio) [6], y otro utilizando LWA de origen natural modificados mediante procesos industriales (Leca) y SPA (Polímero Gycol) [7].

4.1 Caso 1

En el primer caso se realizo la mezcla sin agregado grueso. Se utilizaron partículas de piedra pómez de entre 1 y 2 mm, en proporciones de 7% y 13% por m³ de mortero, tanto partículas completamente saturadas como parcialmente saturadas. Como SPA se utilizo policarboxilato de sodio en proporciones de 0.3% y 0.6% en peso de cemento. La relación a/c empleada fue de 0.30. Súper-plastificante 0.06% en peso de cemento. Para el estudio se utilizo un cemento portland normal, agua destilada y arena natural como agregado fino (tamaño de grano acorde a ASTM C778-05 (ASTM C 2005)).

Se realizaron 5 dosificaciones diferentes para el estudio (Tabla 1). Las principales variables fueron el tipo y porcentaje de agente de curado, así como también si las partículas estaban completamente saturadas o parcialmente saturadas.

4.1.1 Procedimientos experimentales

Los morteros fueron realizado con un mixer estándar semiautomático. El mezclado fue realizados de acuerdo a ASTM C305-99 (ASTM 1999). El super plastificante fue completamente disuelto en el agua de mezclado. Para los morteros de SAP todos los ingredientes fueron pre-mezclados durante 30 segundos, el súper plastificante fue añadido con el agua durante los siguientes 90 segundos de

mezclado. El tiempo total de mezclado desde la primera adición de agua fue de 5 minutos para LWA y 8 minutos para los LWA y SPA.

Cubos de 50mm de lado fueron realizados para evaluar la resistencia a la compresión. Se realizaron en acero y desmoldados luego de 1 día.

4.2 Caso2

En el segundo caso el LWA fue leca en proporciones de 0.0%, 10%, 15% y 20% por volumen de arena y también se utilizaron SPA, se optó por la utilización de polímero glycol, en 1%, 2% y 3% del peso de cemento. El contenido de cemento fue de 300, 400 y 500Kg/m³, y la relación a/c 0.5, 0.4 y 0.3. Sumado a esto se utilizó un 15% de sílice activa por peso de cemento como agregado.

Ambos agentes de curado fueron hidratados previamente durante 24 horas antes de ser colocados en la mezcla de hormigón.

Se realizaron 12 dosificaciones diferentes para el estudio (Tabla 2). Las principales variables fueron el tipo y porcentaje de agente de curado, contenido de cemento y la relación a/c.

Tabla 2
Fuente: [1]

DOSIFICACIONES DE HORMIGON (Kg/m ³)								
Nro.	Cemento	Silice activa	Agua	Superplast.	Agente de autocurado		Arido G	Arena
					Glycol	Leca		
1	400	0	120	8	0	0	1252	674
2	400	0	120	8	0	26	1252	607
3	400	0	120	8	0	39	1252	573
4	400	0	120	8	0	52	1252	239
5	400	0	116	8	4	0	1252	674
6	400	0	112	8	8	0	1252	674
7	400	0	108	8	12	0	1252	674
8	400	0	192	2,4	8	0	1128	608
9	400	0	152	4	8	0	1189	640
10	300	0	84	12	6	0	1360	732
11	500	0	140	5	10	0	1142	616
12	400	60	129	4,6	9,2	0	1174	632

4.2.1 Materiales y proporciones

Para el estudio se utilizó un cemento portland normal, junto con sílice activa en algunos casos, arena sílicea como agregado fino (MF=2.79) y como agregado grueso una gravilla de tam. máx.=20mm. La sílice activa contenía un 95% de sílice y estaba en forma de polvo. Como súper plastificantes se utilizaron naftalenos, la dosis se fue ajustando para producir hormigones con el mismo asentamiento de 120±10mm y no mostraron signos de segregación durante el vertido del hormigón dentro de las probetas. La leca fue secada a horno a 105°C durante 24 horas, enfriada al aire y luego sumergida en agua durante 24 horas previo a la incorporación al hormigón. El polímero glycol también fue pre-hidratado durante las 24 horas previas a su incorporación al hormigón.

4.2.2 Procedimientos experimentales

La mezcla de los componentes del hormigón se realizó con un mixer horizontal. Todos los componentes secos fueron mezclados durante 2 minutos para asegurar una uniformidad de la mezcla. La mitad del agua de dosificación fue agregada gradualmente durante el mezclado, seguido se le agregó el agua restante con el súper

RESISTENCIA A LA COMPRESION (Mpa)			
Ref.	1 Dia	7 Dias	28 Dias
REF	43	74,8	89,6
POMEZ 1	47,1	76,9	91,9
POMEZ 2	42,4	68,3	75,5
SAP 1	44,6	73,6	92
SAP 2	39,7	64,2	87

Tabla 3
Fuente: [6]

plastificante. Los agentes de auto curado fueron agregados gradualmente durante el mezclado del hormigón. El mezclado de los componentes se continuo por un periodo de dos minutos. Después del mezclado se llenaron probetas de dos tamaños diferentes: unas de 100x100x100mm y otras de 100x100x500mm. Los mismos fueron realizados en acero y se desmoldaron luego de 1 día.

5. Resultados y discusión

5.1 Caso 1

Los valores medios de la resistencia a la compresión hasta los 28 días se pueden observar en tabla 3. Se observó buena concordancia entre los valores de los probetas cúbicas. Los resultados muestran un incremento mientras va aumentando la edad.

Los valores más altos de resistencia a compresión a 1 día fueron los de Pómez 1 y SAP 0.3%, a los 7 días Pómez 1 y a los 28 días Pómez 1 y SAP 0.3%. Altas cantidades de LWA y SAP muestran una disminución de la resistencia a compresión en todas las edades.

5.2 Caso 2

Los valores medios de la resistencia a la compresión hasta los 28 días se pueden observar en tabla 4. Se

RESISTENCIA A LA COMPRESION (Mpa)			
Ref.	1 Dia	7 Dias	28 Dias
REF	25	31	38
LECA 10%	26	33	41
LECA 15%	27	35	44
LECA 20%	28	37	47
SAP 1%	28	38	44
SAP 2%	29	40	46
SAP 3%	31	40	48

Tabla 4
Fuente: [1]

observó un aumento sistemático para las mezclas que utilizaron leca como agente de auto-curado, que podría ser atribuido a la continuidad del proceso de hidratación proporcionado a la pasta de cemento mediante el uso de partículas de leca saturadas, resultando en menor porosidad y mejor zona de transición.

A los 28 días hormigones con 10%, 15% y 20% de LWA (leca) obtuvieron una mayor resistencia a la compresión en un 10%, 17.5% y 15% respectivamente comparadas con la mezcla de hormigón convencional, indicando que la relación de 15% de leca resulta la mejor.

El concepto de polímero glycol es reducir la evaporación de agua del hormigón, por lo tanto incrementa la capacidad de retención de agua del hormigón comparada con un hormigón convencional. Los resultados mostraron un significativo aumento de la resistencia a la compresión.

A los 28 días hormigones con 1%, 2% y 3% de SPA (polímero glycol) obtuvieron una mayor resistencia a la compresión en un 20%, 32.5% y 25% respectivamente comparadas con la mezcla de hormigón convencional, indicando que la relación de 2% de SPA resulta la mejor.

6. Conclusiones

Este trabajo se focalizo en el uso de LWA como la piedra pómez o leca conjuntamente con SPA para el curado interno del hormigón. Las conclusiones se listan a continuación:

- La adición de LWA reduce la retracción autógena. La eficiencia de reemplazar parcialmente el agregado fino por distintos contenidos de LWA dependerá del tamaño de partícula, la cantidad, el grado de saturación y la porosidad. La incorporación de LWA completamente saturado reduce sustancialmente la retracción autógena y mitiga la fisuración a temprana edad.

- SAP pueden ser usados como un medio de introducción de reservorios de agua interna para eliminar la retracción autógena, pero el SAP a utilizar tiene que ser cuidadosamente elegido. En el caso de los policarboxilatos de sodio las adiciones de 0.3 o 0.6% llevaron a una menor y sucesiva reducción de la retracción autógena,

sin embargo, con un aumento en la cantidad de SAP no se logro una eliminación de la retracción autógena completa.

- La reducción de retracción autógena utilizando policarboxilato de sodio como agente de auto-curado fue mucho menor que la reducción utilizando piedra pómez, sin embargo entre los otros componentes la relación fue inversa, le reducción de retracción autógena utilizando leca fue mucho menor que la reducción utilizando polímero glycol.

- Un aumento en la cantidad de LWA o SAP puede llevar a una reducción de la resistencia a compresión (especialmente con cantidades muy altas).

- La importancia de la estructura interna de los LWA para el curado interno quedo demostrada. El uso de piedra pómez saturada o leca saturada lleva a una menor retracción autógena y mayor resistencia a la compresión comparada con las otras mezclas.

Referencias

[1] Mousa, M.I.; Mandy, M.G.; Adbel-Raheem, H; Yehia,A.Z.Y. Self-Curing concrete types; water retention and durability. Alexandria Engineering Journal. 2015, 54, 565-575.

[2] El-Dieb, A.S. Self Curing concrete: Water retention, hydration and moisture transport. Construction and building materials 2007, 21, 1282-1287.

[3] Justs, D.; Wyrzykowski, M.; Bajare, D.; Laura, P. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-highperformance concrete. Cem. Concr. Res. 2015, 76, 82-90.

[4] Madduru, S.R.I.; Pallapotha, S.N.R.; Pancharathi, R.K.; Garja, R.K.; Chakilam, R. Effect of self-curing chemicals in self-compacting mortars. Construction and Building Materials 2016, 107, 356-364.

[5] Krishna, J.B.; Jaipal, R. Comparative and experimental study on self-curing concrete. Int. J. Res. Sci. Adv. Eng. 2017, 2, 118-129.

[6] Rodriguez de Sensale, G; Freitas Goncalves, A; . International Journal of Concrete Structures and Materials Vol.8, 2014, 3, 229.238.

[7] Mousa, M.I.; Mandy, M.G.; Adbel-Raheem, H; Yehia, A.Z.Y. Mechanical properties of self-curing concrete.

Hormigones de secado rápido para pavimentos

María Sabrina Sánchez Sarabia¹

1. e-mail: msabrinasantchez@gmail.com

Palabras clave: Pisos, aditivos, hormigón, secado rápido, humedad.

Resumen: El presente trabajo está basado en la problemática y controversias que se presentan a la hora de la colocación de pisos de madera. Estos problemas se deben en su mayoría a la humedad presente en los contrapisos así como también en la nivelación que los mismos deben tener, por lo tanto, se pretende abordar el tema de los hormigones de secado rápido para ser revestidos con pisos específicamente de ingeniería o flotantes. En este caso se propone la búsqueda de aditivos que permitan dicha característica en el hormigón y consecuentemente se puedan revestir con pisos que no admiten humedad mayor al 3% en el sustrato. Por otro lado, se plantean los productos autonivelantes y sus tiempos de secado, usos y especificaciones.

Key words: Floors, additives, concrete, fast-drying, humidity.

Abstract: The present work is based on the problems and controversies that arise when laying wood floors. These problems are due mostly to the moisture present in the floors as well as the leveling that they must have, therefore, it is intended to investigate fast-drying concretes to be coated with specifically engineered or floating floors. In this case it is proposed to search for additives that allow this characteristic in the concrete and consequently can be coated with floors that do not admit humidity greater than 3% in the substrate. On the other hand, research is carried out on self-leveling products and their drying times, uses and specifications.

1. Introducción

La relación existente entre los pisos de madera o similares y la humedad, es sin duda una de las más polémicas dentro de este tema y a su vez la menos entendida por las personas ajenas a este ambiente. Este trabajo surge de la experiencia de trabajar en una empresa de venta y colocación de dichos pisos. El rol en la empresa abarca desde la venta y asesoramiento al cliente de todos los productos para pisos y en el caso de la compra con colocación, incluye el control de la misma. La colocación implica una serie de controles y requisitos a tener en cuenta antes de proceder con la misma. Dichos controles son muy rigurosos ya que de los mismos

depende el correcto funcionamiento del piso a colocar, en general hay requisitos que son básicos para poder llevar a cabo cualquier colocación, ya sea de pisos de ingeniería como de pisos flotantes. Estos se resumen en el nivel de humedad, firmeza y nivelación de los sustratos. Para el profesional a cargo y para el cliente es fundamental conocer cómo y por qué se ve afectada la madera por la humedad del ambiente o piezas asociadas a la misma. Esto evitaría problemas luego de la colocación de los pisos. En este trabajo nos vamos a centrar en el contrapiso como el sustrato a estudiar ya que es el que más se ha relevado y se pueden tener más datos. En cuanto a los pisos que se utilizan para revestir dichos sustratos tenemos

dos tipos. El primer tipo es el piso de ingeniería (colocación pegada) que se compone por tablas en las cuales la base se realiza con tableros multicapa mediante un proceso industrial de avanzada, permitiendo así mayor estabilidad dimensional y alta resistencia ante variaciones de humedad y temperatura. El tablero multicapa está elaborado con finas chapas de madera pegadas con las fibras transversalmente una sobre la otra con resinas sintéticas mediante fuerte presión y calor. Esta técnica mejora notablemente la estabilidad dimensional del tablero obtenido respecto de madera maciza.

El segundo tipo de piso es flotante y se compone de varias capas normalmente de derivados de madera, siendo la última un compuesto sintético que puede variar de composición pero que generalmente es un compensado de HDF que lleva impreso un dibujo imitando madera. Dichos pisos como el nombre lo indica, son de colocación flotante, sin pegamento, tornillos ni anclajes, sobre una manta de espuma de polietileno.

Estos pisos, tanto de ingeniería como flotantes tienen ciertos requisitos sobre la superficie en donde van a

ser colocados, si la misma no está nivelada, seca y firme, no van a tener un buen desempeño. En este caso vamos a profundizar sobre la humedad que estos admiten, los efectos que produce sobre las tablas y como sería la mejor forma de hacer la mezcla para el contrapiso teniendo en cuenta que se va a colocar un revestimiento de este tipo encima.

Continuando sobre el problema, en base a la experiencia, debemos decir que el mayor inconveniente es que el cliente, quien decide la colocación de estos pisos, no tiene en cuenta los tiempos entre que se realiza el contrapiso y el revestimiento. Por un lado, se debe a que el cliente no tiene por qué saber y no está informado al respecto y por otro lado también se debe a que en el momento que deciden realizar la colocación no están dispuestos a esperar semanas para que la humedad se seque, (partiendo de la base de que hay humedad).

2. Sobre la humedad de los componentes

Contenido de humedad en el piso de madera

El contenido de humedad en la madera es la cantidad de agua que posee expresada en

Figura 1 Esquema de piso de ingeniería.

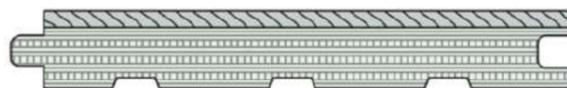
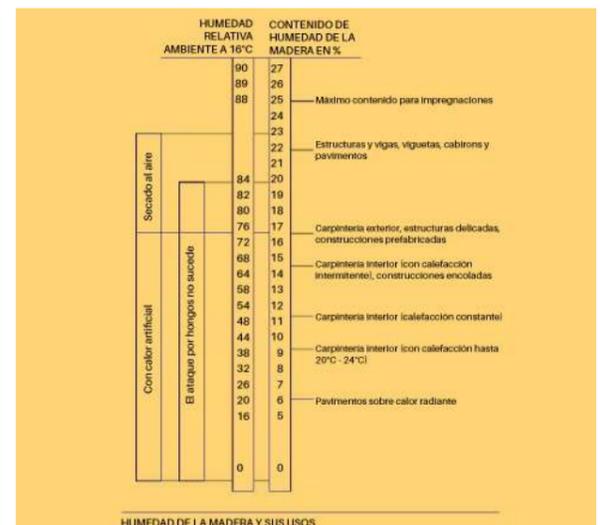


Figura 2 Esquema de piso flotante.



Figura 3 Humedad de la madera y sus usos.



porcentaje. Se obtiene mediante el pesaje de la madera húmeda y la diferencia con el de la madera seca. Esto se traduce en la cantidad de agua que hay en la pieza con relación al peso total

Humedad relativa del ambiente

Humedad relativa, o “HR”, mide la cantidad de agua en el aire en forma de vapor, comparándolo con la cantidad máxima de agua que puede ser mantenida a una temperatura dada.

El piso de madera como material higroscópico

En primer lugar, se deben dejar claras bases de la problemática, mencionando que muchos de los materiales de construcción utilizados hoy (cementos, hormigón, yesos, ladrillos, maderas y tableros, etc.), son materiales higroscópicos, es decir, tienen la capacidad de intercambiar humedad entre sí, y con el medio que los rodea. Todos estos materiales, con el tiempo, alcanzan un equilibrio higroscópico que dependerá de las condiciones de temperatura y humedad ambientales.

En el caso de que la losa tenga un contenido de humedad superior al equilibrio higroscópico, el exceso de agua será transmitido al medio, o a los materiales en contacto con ella, como puede ser la madera. En la bibliografía técnica (Medina, G. 2005), se estima que para humedades del sustrato superiores al 4%, por cada grado de humedad de más que tenga la losa, se transmitirán a la madera entre 4 y 5 puntos de humedad.

De esta forma, tenemos lo que se llama humedad de equilibrio higroscópico “HEH”, que es el contenido de humedad que alcanza el pavimento de madera, como respuesta a la humedad relativa del aire y la temperatura del ambiente que lo rodea. Este cambio no es inmediato y, requiere de cierto tiempo de exposición.

Por todo esto, se estima que el pavimento de madera tiende a equilibrar su humedad contenida en función a dos aspectos del medio que lo rodea: la humedad relativa y la temperatura. Esto indica que, si el piso va a estar en contacto directo con

un contrapiso de hormigón y la humedad del hormigón es elevada, la madera la absorberá y cambiará de dimensión.

En general el contenido de humedad de la madera, durante los procesos de hinchazón y merma, no sobrepasará el 30%, a no ser que la sumerjamos en agua, ni tampoco bajará del 4-5%.

Los pavimentos de madera, en el momento del suministro, se entregan con un contenido de humedad de entre el 7% y el 11%. Dependiendo de la zona y de si va a ser instalado con sistemas de calefacción, el contenido está más cercano al 7% o al 11%, para precisamente, reducir al mínimo los movimientos de la madera al intentar adaptarse al medio que lo rodea. Se recomienda que la humedad relativa, generalmente, se sitúe entre el 40-70% y la temperatura esté comprendida entre el 21-24%.

Contrapisos

En este caso el tipo de sustrato que estaremos evaluando es el contrapiso de hormigón ya que, de la mala ejecución o control del mismo, derivan los problemas de los pavimentos de madera.

El contrapiso que genera mayores inconvenientes en cuanto a la humedad, siempre se corresponde con la planta baja de los locales a colocar piso de madera. Generalmente estas piezas son hechas con un hormigón pobre que no posee gran cantidad de cemento por lo tanto entendemos que, dentro de otras variables, ésta es una por la cual siempre absorben más humedad.

Procedimientos

El sistema para la colocación de pisos de madera comienza por un control del sustrato, dicho control se hace visualmente y también es medido por aparatos como por ejemplo higrómetros.

Hoy en día existen numerosos sistemas de control del contenido de humedad de los materiales, desde los más clásicos, como el método de desecación en estufa, aún hoy considerado como método

de referencia, por su fiabilidad, pasando por métodos físicos, como el de resistencia eléctrica o radiofrecuencia, químicos como el del carburo de calcio, o físico-químicos como el de la cámara de condensación, denominado por algunos autores “de isoterma de sorción”.

En este caso, luego de corroborar que el contrapiso se encuentra nivelado y firme se procede a medir la humedad con un higrómetro que trabaja por radiofrecuencia. Esta no debe superar el 3% en el higrómetro para hormigón que cuenta con una escala del 0%-6%.

En cuanto al ambiente el nivel óptimo de humedad relativa es de 40/50% y la temperatura de 20°C.

Los métodos de Contacto: Alta frecuencia y Capacitivos Se basan unos, en la medición de la pérdida energética por absorción y dispersión, de las ondas de alta frecuencia (microondas), en el material de ensayo, los otros (los capacitivos), en la medición de la variación del campo eléctrico. En los dos casos, las variaciones están influenciadas por la humedad.

Este tipo de equipos está cada vez más extendido, debido a la facilidad y rapidez de manejo, y a que se pueden utilizar con variedad de materiales, incluida la madera. Basta con situar el equipo sobre el material de ensayo, o la superficie de medida.

Ajustamos el selector de medida al material a ensayar, de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Realizamos la lectura.

Ventajas:

- Se trata del método más rápido y sencillo.
- Son totalmente no destructivos.
- Sirven generalmente para otros materiales de construcción, incluida la madera.
- Permiten hacer muchas mediciones en poco tiempo, por lo que resultan muy útiles cuando hay que analizar grandes superficies.

Inconvenientes:

- La medida es, en general, menos fiable que con los métodos alternativos. Son más para tantear el estado general, que para obtener un valor definitivo de la humedad.
- Hay una importante cantidad de marcas y modelos en el mercado, con comportamientos muy diferentes, y, por tanto, diferentes grados de fiabilidad.
- Existen muchos factores de influencia no controlados (Temperatura, irregularidades

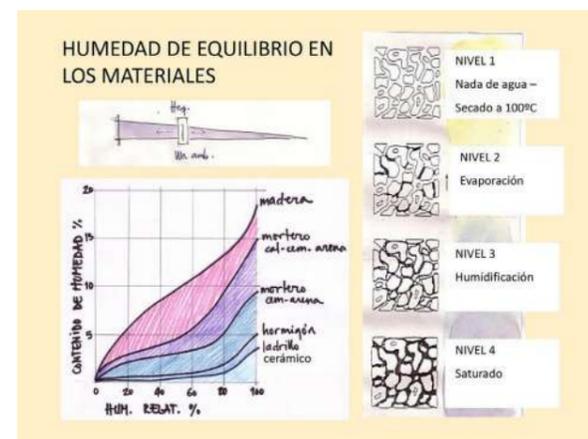


Figura 4 Humedad en equilibrio de los materiales

superficiales, electricidad estática, etc.) que pueden desvirtuar los resultados sensiblemente.

- No se puede hacer una medición por estratos, ni siquiera controlar la profundidad de medición.

Problemática

En la colocación de pisos de madera la mayor problemática es la humedad del contrapiso. Dicha humedad es absorbida por la madera provocando un cambio de dimensión, un hinchamiento que deja el piso de manera inhabitable, se genera una especie de efecto dominó que levanta una tabla y sigue con las demás, el producto de esto es una loma en el piso en donde no se puede caminar y la solución es el recambio del mismo.

Orígenes

Como se mencionó anteriormente, estos problemas pueden ser por varias situaciones. Generalmente se divide en tres: el primero deriva del tiempo de realizada la losa, el segundo deriva de la ubicación y el tercero deriva de la composición.

En cuanto al tiempo entre la realización del hormigón y la colocación del piso de madera, podemos decir que en este caso el cliente no toma en cuenta los tiempos de secado del contrapiso y se genera un cronograma en donde al mes de colocado el hormigón se quiere colocar el piso, siendo esto inviable por los problemas ya mencionados, siempre y cuando hablemos de hormigón convencional.

Sobre la ubicación de la losa, nos encontramos con que, por razones obvias, las losas a nivel del suelo siempre tienen más humedad que las que se encuentran en pisos superiores, esto se debe al ascenso de agua por capilaridad.

En cuanto a los componentes de los contrapisos se puede decir que en algunos casos es probable que la sucesión de capas se encuentre mal ejecutada o directamente le pueda faltar la impermeabilización que en el caso del contacto con el suelo es lo que aislaría el agua.

De la experiencia

A continuación, se plantean algunos ejemplos de situaciones óptimas y situaciones en donde la humedad llegó a dañar la madera.

El primer caso es uno de los ejemplos en donde se encuentra todo en correctas condiciones para poder colocar piso. El edificio, Puerto Lago consta de dos torres de apartamentos y una superficie a cubrir con pisos vinílicos y de ingeniería de 1400m². La medición de humedad se realizó en el mes de febrero y el higrómetro marcaba un porcentaje del 3%, eso indica que se puede colocar sin problemas, las losas fueron realizadas en los meses de julio, agosto 2018.

En el caso del segundo ejemplo, es un edificio de 5 pisos, con 400m² a colocar de piso flotante, (melamínico, HDF), la humedad se midió en el mes de enero y estaba con un porcentaje cercano al 5%, con este nivel es inviable colocar un piso de este tipo. Los contrapisos se habían realizado en el mes de octubre aproximadamente. En este caso se plantearon dos opciones: colocar una barrera de vapor que es un líquido que sella los poros o colocar un nylon correctamente solapado. El cliente decidió colocar nylon, el mismo se colocó hasta la zona del zócalo inclusive subiendo unos centímetros sobre la losa para evitar cualquier contacto del piso con la humedad. Esto dio resultado ya que los apartamentos están en funcionamiento y la empresa no tuvo reclamos sobre inconvenientes con el piso.

El último ejemplo corresponde a la colocación de un piso de ingeniería en una vivienda en planta baja donde el cliente tuvo un inconveniente con la cañería de losa radiante. Se retiró un piso colocado hace 3 años, se reparó la cañería y se rellenó lo picado con arena y portland. La humedad de la losa original de la casa estaba en el entorno del 5,5% por lo tanto se decidió colocar la barrera de vapor para tratar de bloquear lo máximo posible el ascenso por capilaridad de la humedad del terreno y luego se colocó un mortero autonivelante para poder corregir todas las imperfecciones que había.

En este caso luego de 3 días de colocado el nivelante la humedad bajó, quedando entre 3 y 4%.

Acciones sobre la humedad

A lo largo de la experiencia nos hemos encontrado con contrapisos húmedos en los cuales el inconveniente era, en general, el insuficiente tiempo de secado. Para paliar esta situación y poder comenzar o continuar una colocación de piso de madera, se plantean dos opciones: una es la colocación de una barrera de vapor, un producto líquido que sella los poros y evita el ascenso de la humedad, el segundo es una manta de nylon entre el contrapiso y la madera, en este caso el piso debe ser colocado flotante sin opción a pegarlo.

¿Qué se entiende por la humedad en el hormigón?

El proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón se desarrolla por la hidratación química del cemento. Las partículas reaccionan hidratándose y entrelazándose unas con otras

formando la mezcla y desarrollando la rigidez y características necesarias.

Del total del cemento, hay un porcentaje de partículas que no se van a hidratar, por más que se haga un correcto curado por varios días, se estipula que el cemento se hidrata un 70%. Por lo tanto, hay agua que va a ser liberada al ambiente, o en este caso a la madera.

Por otro lado, como el hormigón es un material higroscópico, también va a tender a absorber humedad y equilibrarla con el medio.

Estas dos razones, sumadas a las condiciones del ambiente, serían las principales responsables de que la losa tenga humedad sin secar y sea absorbida por la madera.

Planteo de alternativas

En base al estudio de aditivos y recabando información de las obras recorridas, se plantea como una alternativa que podría ser eficiente en

Figura 5 Piso de ingeniería hinchado por el agua.

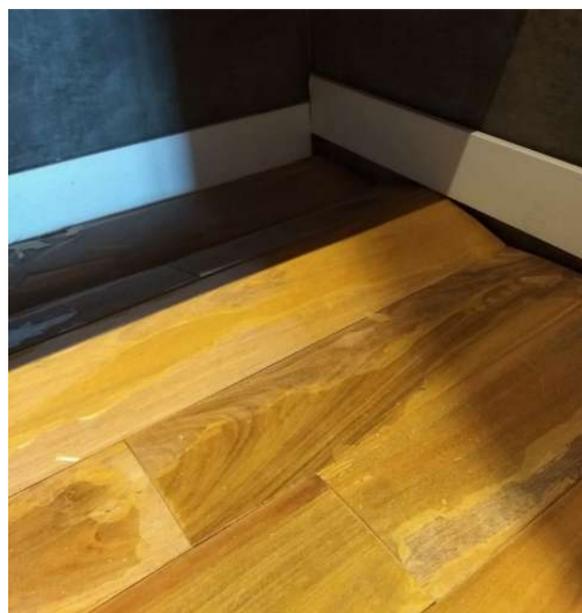


Figura 6 Ficha técnica aditivo acelerante de fraguado Sika.

Sika®-3	
Acelerante de fraguado para hormigón o mortero	
Descripción del Producto	Sika®-3 es un aditivo desarrollado especialmente como potente acelerante de fraguado, para hormigón o mortero, sin pérdida de resistencias finales. Dichas características técnicas se verifican en los ensayos comparativos de hormigones, realizados en la Facultad de Ingeniería y Agrimensura - Informe T-N° 1377 - 03.10.74. Sika®-3 no debe utilizarse en hormigón precomprimido.
Campos de aplicación	<ul style="list-style-type: none"> ■ Para lograr altas resistencias iniciales del hormigón. ■ Para hormigonar con bajas temperaturas. ■ Para la rápida habilitación de pavimentos y bacheos. ■ Para el anclaje de máquinas, lacos, y grampas. ■ Para el hormigonado con presencia de agua permanente.
Datos del Producto	
Forma	
Apariencia / Colores	Líquido opalescente / Celeste pálido.
Presentación	Envases de 860 ml (1 kg.); 4,3 l (5 kg.); 17,2 l (20 kg.) y 172 l (200 kg.)
Almacenaje	
Condiciones de Almacenaje / Vencimiento	2 años a partir de la fecha de fabricación almacenado en los envases originales bien cerrados, en lugar fresco y seco.
Datos Técnicos	
Tipo	Solución de sales minerales.
Densidad	Aproximadamente 1,16 kg/l. Cada kg de Sika®-3 equivale a 0,86 lt.
pH	~ 7.

cuanto a tiempos y procedimientos: utilizar un aditivo acelerante de fraguado. De esta manera se ayuda al secado del contrapiso y se evitan inconvenientes con la humedad. Por otro lado, también se podría plantear la utilización de una mezcla con mayor contenido de cemento (dejando de lado en este informe el tema de costos) ya que esta mezcla liberaría más calor y por consiguiente ayudaría a evaporar más rápidamente el agua. En este último caso, sería correcto evaluar la necesidad de resistencia de la losa y aprovechar la utilización de más cemento para ambos fines, mayor resistencia y menos humedad. De lo contrario, el gasto no sería justificado.

Aditivo

Es un material que aparte de los componentes del hormigón, se incorpora con el fin de modificar sus propiedades aportando un volumen despreciable.

Como se comentó anteriormente, el tipo de aditivo que se recomienda utilizar para que el proceso de secado del hormigón sea más rápido es un acelerante de fraguado.

Aceleradores de fraguado: aditivos que reducen (o adelantan) el tiempo de fraguado del cemento (función principal) de tal modo que disminuyen el tiempo necesario para que los hormigones (morteros o pastas) pasen del estado plástico al estado sólido. Estos aditivos pueden modificar el desarrollo de las resistencias mecánicas del hormigón, mortero o pasta (efecto secundario); a veces se producen de modo temporal resistencias finales menores. La eficacia de estos productos según su naturaleza puede variar en función de la temperatura.

Los usos más comunes del mismo son para dar mayor resistencia inicial o poder desenconfrar rápidamente por ejemplo para piezas prefabricadas, en este caso se propone para lograr que el proceso de hidratación se genere con rapidez así el agua libre en el hormigón comienza a evaporarse prontamente.

Un aditivo que se podría utilizar sería Sika®-3 Acelerante de fraguado para hormigón o mortero. Sika®-3 es un aditivo desarrollado especialmente

como potente acelerante de fraguado, para hormigón o mortero, sin pérdida de resistencias finales. Dichas características técnicas se verifican en los ensayos comparativos de hormigones, realizados en la Facultad de Ingeniería y Agrimensura. (Según ficha técnica de Sika)
Fig.:6 Ficha técnica aditivo acelerante de fraguado Sika.

Autonivelante

El mortero autonivelante se utiliza para nivelar y adecuar la superficie de trabajo, para poder colocar sin problemas otro revestimiento, en este caso pisos de ingeniería o flotantes. Lo que obtenemos tras su aplicación es una superficie firme y lisa. Con esta terminación tenemos una superficie óptima para recibir al revestimiento. El autonivelante presenta varias ventajas, entre ellas se encuentra su fácil aplicación, su rápido secado y su terminación lisa. En este caso tenemos experiencia con el uso de la marca T-CON, la presentación es en bolsas de 25kg y se prepara solamente agregando agua en las proporciones indicadas.

Otra ventaja de este mortero es su rápido fraguado, si bien la humedad depende del espesor que se haya creado la carpeta, también se puede notar que baja en pocos días sin problemas mayores.

La presentación de esta marca viene para espesores de hasta 5cm, dependiendo de su uso.

Nos comunicamos con el departamento técnico de la empresa, pero no nos supieron dar información de los componentes del producto. Debido a que en la descripción de uso del producto indica que no se utilizan aditivos, solamente se mezcla con agua, entendemos que el cemento es un tipo de cemento compuesto con finos o alguna adición que permite la autonivelación del producto.

Algo que podemos notar del autonivelante, habiendo tenido contacto con varios arquitectos y constructores es que todavía no hay mucha información o no se está usando tanto como es necesario para lograr los acabados que se requieren

a la hora de colocar este tipo de pisos. Es grande la cantidad de clientes que colocan pisos flotantes o de ingeniería que tienen un contrapiso relativamente nuevo pero que no tiene el acabado correspondiente para recibir un revestimiento de madera, en este caso en donde se propone el autonivelante.

Otra de las ventajas del autonivelante es el ahorro en mano de obra, por lo tanto, se podría utilizar para sustituir una carpeta tradicional, siempre y cuando los obreros estén capacitados para hacerlo, pero el inconveniente mayor se presenta en que se está utilizando un autonivelante para "arreglar" superficies mal terminadas con un contrapiso tradicional. Se manifiesta el retrabajo, la pérdida de tiempo y dinero en algo que, por un lado, debería haber quedado bien terminado que es el contrapiso y por otro lado se podría haber planteado utilizar directamente un autonivelante teniendo en cuenta las ventajas del mismo.

Humedad

El endurecimiento de la carpeta se empieza a dar a los minutos y al cabo de 24hs ya se puede transitar,

Figura 7: Colocación de autonivelante para reparar acabado.



la humedad con un espesor de aproximadamente 3 mm promedio, queda por debajo del 4% (medida en el higrómetro 0% al 6%) esto indica que, por un lado al ser todo finos tienen mayor superficie específica por lo tanto van a absorber más agua que por ejemplo si hubiera áridos con mayor granulometría, por otro lado el agua que queda libre es poca y al tener un espesor pequeño, la misma se evapora rápidamente.

5 Consideraciones finales

En base a la experiencia en colocación de pisos se puede hacer una afirmación y es que, del total de contrapisos y superficies relevadas, la mayoría presentan problemas de humedad y nivelación para poder recibir los pisos de madera, melamínicos o vinílicos.

Estos problemas derivan de varios factores anteriormente mencionados pero el factor común generalmente es la falta de tiempo (por cronogramas de obra) para el secado correcto del hormigón. Es por esto que consideramos que mediante la utilización de un aditivo acelerante

Figura 8: Autonivelante comenzando a secar al cabo de unos minutos.



Figura 9 Medida de humedad a las horas de colocado el autonivelante = 6%.

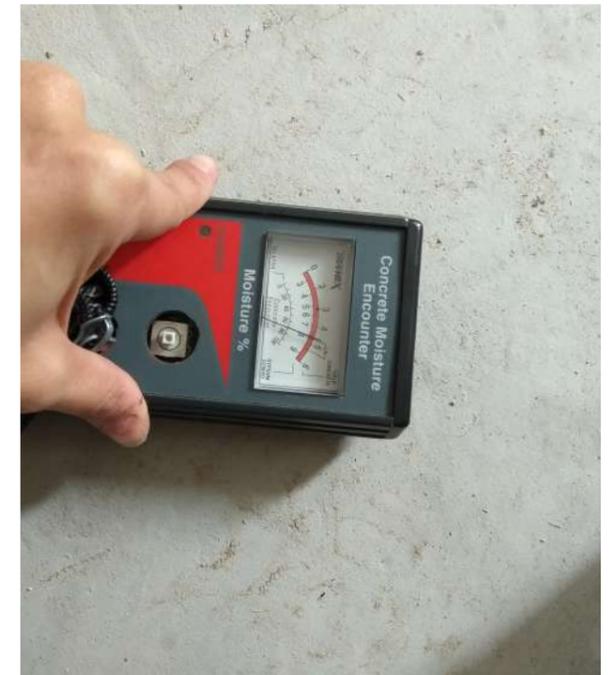


Figura 10 Medida de humedad a las 24 hs. de colocado = 4.8%.

de fraguado o el autonivelante correctamente, se podrían lograr las condiciones óptimas de humedad y nivelación para poder revestir.

En general, puede ser que el problema sea la desinformación del proyectista, constructor, arquitecto director o persona a cargo en cuanto a los requerimientos para la colocación de dichos pisos. Teniendo en cuenta que no puede haber cierto nivel de humedad y se necesita cierto control en el acabado se podría incorporar a nivel de anteproyecto un control en los contrapisos que vaya desde la dosificación hasta la puesta en obra.

Bibliografía

- RIXOM, M. (1984). Aditivos para los hormigones. BARCELONA: Editores técnicos asociados.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, (1991). Aditivos para Concreto (Ed. rev.). México: Noriega limusa.

-Anatomía fisiológica y patología del hormigón con y sin adiciones. Aspectos físico-químicos del hormigón. Recuperado de: UEP Universidad de la República, Facultad de Arquitectura.

-Carles Broto Comerma, C. B. (2006d). Enciclopedia Broto de patologías de la construcción. Barcelona: Links International.

-Página web consultada 28/05/2019: Humedad de Construcción | Construpedia, enciclopedia construcción https://www.construmatica.com/construpedia/Humedad_de_Construcci%C3%B3n

-Página web consultada 31/05/2019: Cómo medir humedad en soleras de cemento, base para suelos de parquet, tarimas y laminados. Problemas con el suelo de parquet -¿Por qué se levanta el parquet? . El suelo de madera y la humedad: Todo lo que debes saber. <https://blog.expertosenparquet.com/2015/02/como-medir-humedad-en-soleras-de.html>

-Página web consultada 31/05/2019: Instalación de pavimentos de madera https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_5676_2714045.pdf

-Página web consultada 01/06/2019 “HUMEDAD DEL SUELO EN EDIFICACIONES” http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/fernandez_jc/sources/fernandez_jc.pdf-Página web consultada 01/06/2019: <https://ury.sika.com/content/uruguay/main/es/produccion-de-hormigon/soluciones-produccion-hormigon/audiobook-aditivos-para-hormigon.html>

-Página web consultada 01/06/2019:<https://rainierasphalt.com/>

-Página web consultada 07/06/2019: <http://www.tcon.uy/>

-Página web consultada 07/06/2019:http://www.urumix.com.uy/wp-content/uploads/fichasurumixpdf/fichaPisoLiso_20151005.pdf

-Página web consultada 07/06/2019: <http://www.cieloazul.com.uy/index.php/noticias-hormigon/24-noticia-izquierda/58-mortero-autonivelante>.

Página web consultada 09/06/2019: <http://informesdeconstruccion.revistas.csic.es>

Comparativa hormigón convencional - hormigón autocompactante.

Aplicación a viviendas unifamiliares

Lucia Emilia Cabrera Alcorta¹

1. e-mail: lu.e.cabrera@gmail.com

Palabras clave: Hormigón visto, Durabilidad, Hormigón autocompactante.

Resumen: En función de las causas de deterioro del hormigón visto, se pretende elaborar un punteo de los elementos que determinen un aumento de la vida útil y establecer sobre qué aspectos específicos del hormigón se podría mejorar su capacidad de desempeño. Se busca realizar una evaluación de las propiedades del hormigón autocompactante para determinar la pertinencia de su utilización en el programa de viviendas unifamiliar.

Key words: Exposed concrete, life span, Self-compacting concrete.

Abstract: Depending on the causes of deterioration of exposed concrete, it is intended to list the elements which determine an increase in life span and establish on which specific aspects of concrete can performance capability upgrades be obtained. The aim is to evaluate the properties of self-compacting concrete to determine the relevance of its use in single-family houses.

1. Introducción

Transcurridos varios milenios desde su utilización para la construcción de edificios, el uso de hormigón se fue perfeccionando en búsqueda de dotar al material de calidades de desempeño mayores.

Los problemas de durabilidad del hormigón, asociados a escaso conocimiento de las dosificaciones más adecuadas o a resultados de ejecución que distan de los esperados, posiciona al mismo, dentro de la construcción de viviendas unifamiliares, como un elemento de uso estructural por lo general confinado a ser recubierto en búsqueda de extender su vida útil.

Se desconocen, en la mayoría de los casos, las problemáticas asociadas a la exposición de un hormigón pobre a agentes atmosféricos, condicionando la propuesta a una durabilidad

limitada. Por esta razón, la elección de los materiales componentes del hormigón visto debe de ser más rigurosa que la de los hormigones convencionales, asegurando requisitos de durabilidad y de aspecto estético.

La búsqueda de control de los aspectos finales del hormigón, tanto de texturas superficiales como de color, resulta complicada. Esto estaría determinado por prácticamente todos los factores: tipo de material, dosificaciones, puesta en obra, absorción del encofrado y curado. Para ello el material a utilizar se debe diseñar correctamente e incorporar nuevas técnicas que persigan la perfección de los acabados.

En función de las causas de deterioro del hormigón visto, se pretende elaborar un punteo de

los elementos que determinen un aumento de la vida útil y establecer sobre qué aspectos específicos del hormigón se podría mejorar su capacidad de desempeño. Se busca realizar una evaluación de las propiedades del hormigón autocompactante para determinar la pertinencia de su utilización en el programa de viviendas unifamiliar.

2. Principales procesos químicos y electroquímicos de degradación del hormigón

En función de las causas de deterioro de las estructuras de hormigón visto se pretende elaborar un punteo de los elementos que determinen un aumento de la vida útil y de la durabilidad del hormigón.

Se desarrolla a continuación un punteo de los principales procesos de degradación para analizar acciones preventivas posibles.

2.1 Ataque de sulfatos

Alteraciones debidas al ataque de sulfatos, existentes en aguas y suelos, dan como consecuencias agentes expansivos. La reacción del compuesto de aluminato del cemento portland hidratado con el sulfato origina etringita que provoca un aumento de volumen y puede eventualmente llenar los poros del hormigón, desarrollando presiones suficientes para producir fisuraciones, por ende, la resistencia de la pieza disminuye.

Como estrategia para evitar este ingreso se desarrollan hormigones impermeables (bajas relaciones a/c) y cementos de bajo contenido de aluminato tricálcico.

2.2 Reacción álcali-sílice.

En la mayoría de los casos estas reacciones involucran sustancias que se encuentran dentro de la masa del hormigón y que en presencia de agua reaccionan.

Se debe seleccionar correctamente el agregado de manera de evitar la reacción y cuidar la impermeabilidad del hormigón diseñado.

2.3 Corrosión de armaduras.

La mayor parte de los deterioros en las estructuras de hormigón armado se deben a la corrosión electroquímica provocada por la presencia de agua y oxígeno en el interior del hormigón. La corrosión determina un aumento del volumen original de la armadura determinando fisuraciones, grietas e incluso estallido de la pieza de hormigón.

El hormigón que recubre las armaduras actúa como una capa pasiva para las armaduras que lo protege de agentes externos, para ello es necesario que mantenga un $\text{pH} > 11$ y que el recubrimiento del acero evite la llegada del agua a la superficie de las armaduras.

"La película pasiva protege a las armaduras frente a la corrosión, incluso en presencia de humedad y oxígeno. Sin embargo, esta película puede destruirse localmente o en toda la superficie de la barra debido a: disminución de la alcalinidad por carbonatación, lixiviación de hidróxido de calcio y de álcalis por circulación de agua en juntas de construcción, fisuras o sectores con hormigón de mala calidad (oquedades, alta relación agua/cemento), o la presencia de cloruro en una determinada concentración crítica. Como consecuencia de alguno de los factores antes mencionados, la barra en el hormigón comenzará a corroerse siempre que exista alta humedad y disponibilidad de oxígeno" [1].

Con respecto a los puntos nombrados anteriormente:

-Sobre la disminución de la alcalinidad por carbonatación, se debe considerar que el tiempo necesario para que el frente de carbonatación penetre y alcance las armaduras depende de la porosidad del hormigón y del espesor de recubrimiento.

-La lixiviación de hidróxido de calcio y de álcalis solo se produce si los poros están interconectados permitiendo el ingreso del agua. Dicha interconexión puede manipularse al momento del diseño de la mezcla, dada su relación directa con el avance de las reacciones de hidratación y por la relación agua/cemento.

-El ingreso de iones cloruro o la presencia del mismo en la mezcla destruye la capa pasiva de forma puntual pudiendo llegar a seccionar las barras, proceso problemático dado que determina conflictos con la capacidad de resistencia y colapsos sin aviso. De manera de evitarlo, es necesario minimizar la presencia de cloruros en los elementos que conforman la dosificación.

"El contenido de cloruro en el hormigón a nivel de las armaduras depende de la difusividad del ion y de la geometría del sólido. La difusividad depende de la naturaleza del cemento y de la compacidad del hormigón. La geometría que se ha de considerar es la concerniente al espesor del recubrimiento de hormigón sobre las armaduras y a la microfisuración del hormigón." [2]

Se podría resumir que, tras un breve análisis de los mecanismos de deterioro más usuales del hormigón, es necesario hacer hincapié en las características propias del mismo y en un buen recubrimiento, cuyo espesor dependerá del ambiente en el que se encuentre la estructura.

3. Tratamiento del hormigón visto posterior al fraguado.

Como estrategia para asegurar una mejora en el desempeño del hormigón visto convencional, se tiende a revestir evitando el ingreso de agua o protegerlo superficialmente con productos que impidan el ingreso de agentes agresivos. Estas protecciones superficiales son recurrentes en caso de procurar un hormigón visto.

"Ese tipo de protección inhibe la penetración de agentes agresivos por difusión, migración y absorción por capilaridad. Los materiales de protección de superficie para concreto pueden ser clasificados en tres grupos: hidrofugantes (repele el agua), bloqueadores de poros (reaccionan con algunos componentes solubles del concreto y forman productos insolubles) y formadores de película (forman una película continua en la superficie del concreto). La Figura 1 ilustra esos tres grupos de protección de superficie." [3]

La elección de la protección de la superficie dependerá de las condiciones de la misma, por lo que en caso de elegir formadores de película solo podrán aplicarse sobre superficies lisas y de poros muy pequeños. Sin embargo, estos modifican la estética de la estructura adicionando brillo o color superficial, lo que podría modificar la estética del hormigón de manera no deseada. Por otro lado, los bloqueadores de poros son productos compuestos por silicatos, que penetran en los poros superficiales y reaccionan con la portlandita formando C.S.H. De esta manera, se genera una capa menos porosa en la capa superficial del concreto, modificando la penetración de agua en el material sin alterar estéticamente la superficie.

La aplicación de estos productos requiere de mantenimiento, por lo que serán necesarias varias operaciones de pintado a lo largo de la vida de la obra. El mecanismo desarrollado por estos bloqueadores puede contemplarse en la propia generación del hormigón, cuidando aspectos de dosificación y ejecución para tener una porosidad que no propicie a la penetración de CO_2 ni de

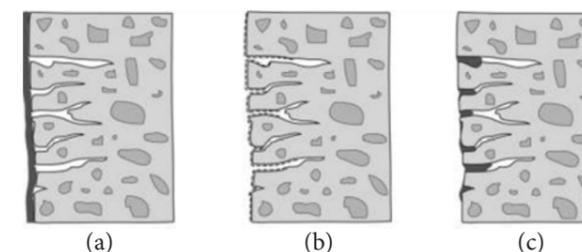


Figura 1 Grupos de tratamiento de superficie para concreto: (a) formadores de película (b) bloqueadores de poros (c) hidrofugantes de superficie. Fuente: Adaptado de Keer, 1992.

cloruros. Parecería clave tomar conciencia del rol del curado para asegurar la buena calidad del hormigón en su superficie, dotándolo de agua y temperatura adecuadas para que desarrolle los productos de hidratación que bloquen la interconexión entre poros. De esta manera se lograría una economía de recursos, generando superficies que no necesiten tratamientos adicionales después del desencofrado.

4. Consideraciones preliminares

“...la porosidad del hormigón se puede definir por la suma de los poros de gel, que son pequeñísimas dimensiones y sin importancia para la corrosión; vacíos originados por el aire atrapado, que en general se evitan con una buena compactación, y los poros capilares, que se forman al evaporarse el agua de laborabilidad, que es aquella que excede al agua necesaria para la hidratación, estos últimos con dimensiones de hasta del orden de los milímetros tienen un papel importante en la facilidad de penetración que tenga un hormigón. Si a lo anterior se unen “errores constructivos” típicos de nuestras obras, como la ausencia o ineficiencia en el curado, se tendrá un hormigón con una red continua de poros capilares fácilmente penetrables por agentes agresivos, como lo constituyen los iones cloruros, presentes tanto en el agua de mar como en el aerosol marino. El mecanismo antes descrito resalta la necesidad de tomar, desde la etapa de planificación de la obra, todos los cuidados que conduzcan a la elaboración correcta del hormigón de las estructuras; entre las medidas más importantes se pudieran mencionar la selección correcta de los materiales constituyentes, incluyendo el empleo de aditivos de última generación que permitan obtener hormigones de fácil colocación con relaciones agua/cemento que no superen el valor de 0.4. Con esto se estaría aumentando la vida útil de las estructuras, con los respectivos ahorros que esto conlleva.” [4]

El control de la porosidad del hormigón, y por ende su compacidad, se vuelve un punto clave en el razonamiento que se viene desarrollando. El llenado se torna casi que una artesanía en sí mismo, la dependencia de un correcto vibrado, y por ende del factor humano en el proceso de ejecución, permite replantear consideraciones en

favor de una puesta en obra en la que el hormigón se asiente y compacte de forma autónoma por medio de su propio peso.

Se desarrollaron previamente los principales factores desencadenantes de la corrosión de las armaduras, considerándolo la patología más recurrente en hormigones vistos. El objetivo fue evaluar los aspectos asociados al ingreso de los frentes agresivos, de manera de poder incorporarlos en el diseño de la mezcla de hormigón, aumentando las prestaciones del mismo con respecto a su durabilidad.

5. Alternativa de uso, hormigón autocompactante.

Como lo define el Artículo 1 del Anejo 17 de la EHE-08 [5] “Se define como hormigón autocompactante, a aquel hormigón que, como consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación, no presentando segregación, bloqueo de árido grueso, sangrado, ni exudación de la lechada”.

Podría considerarse que el uso de un hormigón de estas características, lograría un correcto llenado sin movimiento de las armaduras, cuidando entonces el espesor de recubrimiento y la calidad del mismo. Tomada la decisión de trabajar con hormigones vistos, el uso de autocompactantes, asume menos riesgos de obtener un buen hormigonado y se elimina la necesidad de tener mano de obra calificada para el llenado.

Para lograr estas propiedades de autocompactabilidad, el hormigón debe incorporar en su dosificación una alta proporción de arena y finos y el uso de aditivos que, a pesar de reducir el agua de amasado, confieran de fluidez a la mezcla.

5.1 Estudios sobre la durabilidad en función de la dosificación.

Basándose en el estudio sobre la permeabilidad de distintos hormigones autocompactantes de

resistencia moderada (resistencia característica 30 MPa) realizado por Bermejo, Moragues, Gálvez y Cánovas [6] los resultados de los ensayos de permeabilidad y estructura porosa, muestran un buen comportamiento frente a la penetración de posibles agentes agresivos por la red capilar.

El estudio mencionado se adapta al análisis que se pretende realizar sobre la aplicación de autocompactantes en la construcción de viviendas unifamiliares ya que se realiza sobre dosificaciones que buscan un equilibrio entre prestaciones y precio. Los hormigones estudiados responden a las siguientes características:

-Cementos comunes que no superasen los 350kg de cemento por metro cubico de hormigón.

-Empleo de contenidos bajos de aditivos.

-Tamaño máximo de agregado 16mm (árido grueso rodado y arena de rio, ambos de naturaleza silíceas).
-Adiciones de dos tipos, filler calizo y ceniza volante que no superaron los 250 kg por metro cúbico de hormigón.

-Aditivo superplastificante del tipo SIKA, Viscocrete 3425.

-Relaciones de agua/cemento de entre 0.5 y 0.55.

“... el alto contenido de finos y el empleo de dosis mayores de superplastificantes, en comparación con el hormigón convencional (HC), modifican la estructura porosa, afectando a los mecanismos de transporte de líquidos y gases en el hormigón ... Dado que tanto el comportamiento en estado fresco como la estructura porosa del HAC son dependientes de la combinación cemento-aditivo-filler, se han obtenido las dosificaciones de HAC para los cementos más habituales, de acuerdo a la vigente Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08).” [6]

En función de la lectura del artículo podemos considerar que:

-Respecto a la durabilidad, el hormigón de relación a/c 0.5 con adición de cenizas volantes muestra mayor dificultad al ingreso de agua y agentes agresivos. La ceniza volante crea centros de nucleación en los poros que aumenta la

Tabla. 1 Dosificación HAC (Bermejo, Moragues, Gálvez y Cánovas, 2010).

Hormigón	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tipo de Cemento / Cement type	I 42.5 R/SR	CEM II/A-V 42.5 N	CEM II/A-V 42.5 R	CEM I 42.5 R	I 42.5 R/SR	CEM II/A-S 42.5 N	BL II/ AL 42.5 R	CEM II/A-P 42.5 R	CEM II/B-L 32.5 N
Adición / Addition	Ceniza volante / Fly ash	Filler calizo / Limestone filler							
Cemento / Cement (kg)	280	300	325	350	325	350	375	350	350
Adición / Addition (kg)	200	200	200	200	220	220	156	200	110
Agua (*) / Water (kg)	140	150	162	193	179	193	206	193	193
Arena / Sand (kg)	960	960	960	960	960	960	960	960	960
Grava / Gravel (kg)	695	695	695	695	695	695	695	695	695
Aditivo/Superplasticizer (kg)	4.62 (1.65%)	3.90 (1.30%)	6.50 (2%)	7.35 (2.10%)	7.05 (2.17%)	2.80 (0.80%)	4.31 (1.15%)	6.34 (1.81%)	6.65 (1.90%)
a/c / w/c	0.5	0.5	0.5	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55

compacidad de la matriz. Este hormigón, de los 9 ensayados, es el que representa mayor resistencia a la compresión.

-El resto de los hormigones con adición de filler calizo muestran diferencias significativas con respecto a la permeabilidad y a las resistencias obtenidas de los ensayos, si se lo compara con el hormigón de adición de ceniza volante. En los hormigones con filler se obtienen porosidades parecidas, pero con dispersiones en cuanto al diámetro de poros promedio. El hormigón cuyo porcentaje de filler agregado es menor se corresponde con el que mayor diámetro de poro promedio presenta.

En este estudio se observa también una relación entre la resistencia a compresión y la profundidad de penetración de agua, se aprecia una tendencia general a disminuir la resistencia cuando la profundidad de penetración aumenta, igual que en los hormigones tradicionales.

“ Los valores de profundidad de penetración de agua y resistencia a compresión se interpretan mejor si se comparan con la distribución porosa de los hormigones, en concreto, con el volumen de macroporos ya que éstos afectan a dichos valores ” [6]

Otro aspecto a considerar sería la interconexión entre los poros, dado que si existe tortuosidad la penetración es menor.

Viendo los resultados de este estudio y como los diversos aspectos de la dosificación influyen en la posibilidad de penetración de los agentes agresivos, sería interesante realizar el estudio sobre dosificaciones utilizadas en Uruguay, con respecto a los filler que existen en el mercado y el acceso a los mismos por parte de las hormigoneras.

Según lo presentado en el curso, los filler locales posibles de ser incorporados en las dosificaciones de autocompactantes, son:

-Residuos de Flotación del antiguo proceso de producción de cemento de ANCAP.

-Filler calizo, obtenido de la molienda de piedra caliza de ANCAP.

-Polvo de Electro Filtro de CUCPSA, obtenido del residuo de electrofiltro.

-La Ceniza de Cáscara de Arroz de ARROZUR S.A, obtenido e la quema de cáscara de arroz.

-Polvo de Ladrillo del carrasco Lawn Tennis, obtenido de la molienda de cerámicos defectuosos.

Producto de la discusión del curso, es de imaginar que ciertas hormigoneras tengan acceso limitado o nulo a los filler aprobados por el estudio. Aquellas que si cuentan con el acceso podrían incorporarlos en la dosificación, disminuyendo los costos con respecto a las que no lo puedan hacer y tengan que trabajar con cemento como filler.

Considerar al cemento como filler determinaría, más allá del aumento de costos, un aumento en las resistencias y en la temperatura del hormigón durante su hidratación, aspectos que en este caso no serían de aporte alguno.

La incorporación de filler calizo a los finos del hormigón aumenta la trabajabilidad, dado que influye en la reología. Incluir caliza hace que se formen carboaluminatos, con disminución de resistencia mecánica cuando el agua/cemento es constante, provocando disminución en su permeabilidad. (Escorihuela, et ad, 1993) [7]

Si se profundizara en los efectos de la incorporación de filler sobre la hidratación del hormigón, considerando que es hidráulicamente inactivo, Irassar, et ad, 2015 [8] desarrolla:

-El remplazo parcial de cemento por la adición, produce un aumento de la relación agua/cemento efectivo y que, para un mismo grado de hidratación, implica un menor volumen de productos hidratados de cemento.

-El efecto de la incorporación de filler produce que las partículas finas de las adiciones rellenen el espacio de los granos de cemento, modificando

su empaquetamiento granular, determinando un cambio en la porosidad inicial de la pasta.

Retomando las conclusiones del trabajo realizado por Bermejo, Moragues, Gálvez y Cánovas [6]

“Con los cementos con adición de filler calizo es más difícil conseguir resistencias medias (30 MPa), sin sobrepasar los 350 kg/m³ de cemento, respecto a otros cementos que no poseen esta adición complementaria.”

“El valor de la porosidad total no presenta una gran dispersión en los hormigones con filler calizo, sin embargo la distribución porosa sí que presenta diferencias importantes.”

“...el comportamiento frente a la penetración al agua a presión de los hormigones autocompactantes está determinado no sólo por la dosificación del hormigón, que afecta a las propiedades reológicas y mecánicas, sino también por el porcentaje de macroporos y a su distribución.” [6]

Se podría concluir que el hormigón autocompactante, correctamente dosificado, mejora las condiciones de impermeabilidad del hormigón y que la estructura de los poros varía en función de la dosificación.

Sería interesante verificar la incidencia de costos de la incorporación de filler en los HAC disponibles en mercado y evaluar los distintos comportamientos de los autocompactantes con respecto a su durabilidad.

5.2 Consideraciones en función de la puesta en obra.

5.2.1 Llenado y encofrado

Vale recalcar las bondades del HAC con respecto a la simplificación en el llenado de las piezas. Los espesores de recubrimiento se logran constantes gracias a los separadores, asegurando mayor vida útil. Sin embargo, mediante una lectura rápida de las características de los hormigones autocompactantes, que publican las hormigoneras,

advierten sobre la necesidad de utilizar encofrados de fabricación industrial, para asegurar una buena estanqueidad y resistencia a las sollicitaciones de presión que ejerce el hormigón sobre ellos.

La presión sobre los encofrados varía en función del llenado elegido. Llenados desde las partes bajas, con sus correspondientes vinculaciones para recibir la manguera por la parte inferior, determinan presiones superiores sobre las paredes del encofrado, que aquellas soluciones de llenado desde la parte superior.

Deberá cuidarse de todas maneras el aire incorporado en el llenado, evitando la entrada de aire con la caída del hormigón. De esta manera, se logran superficies con buenos acabados y se ayuda a la compacidad de la mezcla.

Evaluando esta consideración para viviendas unifamiliares, que no se producen en masa, determina un encarecimiento del producto final, aumentando el costo de la construcción, dado que es necesario alquilar los encofrados.

5.2.2 Desencofrado.

Otra consideración que usualmente se toma como positiva, con respecto a la puesta en obra, es el ahorro de tiempo dado que los hormigones adquieren resistencias aptas para el desencofrado rápidamente. De todas maneras, esta consideración debería ser estudiada para hormigones autocompactantes de bajas resistencias con incorporación de filler.

“Debido a sus propiedades, una de las principales ventajas que presenta este tipo de hormigones, respecto a la velocidad del proceso constructivo, es la capacidad de poder aumentar la velocidad con la que es vertido dentro del encofrado. Un aumento en la velocidad de vertido se traduciría en un aumento de velocidad del ciclo constructivo, lo cual no solo genera un ahorro debido a la reducción de los tiempos muertos, sino que también permite alcanzar antes el período de operación de la estructura y, por lo tanto, el retorno de la inversión” [9]

Las consideraciones con respecto a la incidencia de estos tiempos, en obras de gran escala es clara. Con respecto a obras de menor porte debería ser estudiada en profundidad, pudiendo no justificar el sobre costo.

De manera de optimizar los tiempos de alquiler de encofrados se debe manejar el dato de la resistencia a la maduración, que deberá proporcionar la empresa que suministre el hormigón, contemplar un valor resistencia de 5 MPa para desencofrar columnas y aplicar el método de Texeira [9,10].

La lógica responde a que cuanto más resistencia adquiera el hormigón menor es la presión lateral ejercida sobre el encofrado. Por lo tanto, una vez adquirida la resistencia mínima, se pueden retirar los mismos.

La dosificación de HAC utilizada en el estudio experimental no incorpora filler y los áridos no superan 12mm de tamaño máximo. No parece extraño considerar, que las resistencias obtenidas de dicha dosificación, serían mayores al 30 MPa que se viene considerando.

Los valores presentados en el artículo de Texeira, con respecto a la optimización del tiempo de desencofrado en hormigones autocompactantes, arrojan como conclusión que es válido aplicar su método para hormigones autocompactantes.

Materiales	Cantidad
Árido grueso	700 kg/m ³
Arena	780 kg/m ³
Arena fina	325 kg/m ³
Filler	-
Cemento	385 kg/m ³
Agua	169 kg/m ³
Aditivo superplastificante	4'2 lt/m ³
Diámetro máximo del árido grueso (mm)	12 kg/m ³

Sería interesante manejar valores para el caso de hormigones con filler, de manera de evaluar con más datos este aspecto.

5.2.3 Mano de obra

Con respecto a las evaluaciones positivas por el ahorro mano de obra, al referirnos a viviendas unifamiliares con una cuadrilla que no será muy numerosa, y asociado a la escala del trabajo, dependerá de la habilidad de la empresa o del director de obra el planificar actividades para que la cuadrilla continúe trabajando el día del llenado.

5.2.4 Consideraciones en función del acabado pretendido

Haciendo referencia a algunos aspectos desarrollados por Cariñera, 2016 [11] podríamos considerar que independientemente de la elección del autocompactante como material para el llenado hay una serie de aspectos que, si bien se ven favorecidos en ocasiones por este hormigón y sus virtudes, se deberían tomar en cuenta para lograr un correcto acabado:

-De manera de lograr superficies con acabados homogéneos y de calidad, se debe asegurar un suministro uniforme de materiales. Sobre esta condición, se debería manejar un margen de seguridad, dado que quedamos sujetos al suministro de una empresa específica, por las

Tabla 2 Dosificación HAC (Texeira, 2016).

dificultades de dosificación que determina la elaboración del HAC.

-El árido fino influye sobre el color del hormigón. La calidad y la limpieza de los mismos es fundamental para asegurar buenas calidades.

Algunos aditivos pueden generar cambios de tonalidad, así también los materiales desencofrantes y los propios materiales de los encofrados.

-El tamaño máximo del árido seleccionado y la propia naturaleza del autocompactante de cubrir correctamente todos los sectores del encofrado, nos permite asegurarnos correctos acabados sin apariciones de oquedades.

-Se deberá cuidar los encofrados con respecto a sus juntas, dado que en cualquier grieta o defecto puede ocurrir pérdida de pasta. El encofrado determinara la calidad y la textura de la superficie, por lo tanto, se debe tener claro las posibilidades de cada material de encofrado para poder determinar la elección. Se recuerda que el autocompactante replica cada detalle del encofrado, por esto, debe ajustarse a los deseos formales del proyecto la elección del mismo.

-Los productos desencofrantes solventan la posibilidad de que el hormigón se deteriore superficialmente, por la adherencia con el encofrado. En el caso de usar maderas, la humectación de los encofrados elimina la necesidad de desencofrantes, a no ser que sean utilizados por primera vez.

6. Consideraciones finales.

Se desprende del análisis de los mecanismos de deterioro más usuales del hormigón, la importancia de la dosificación para obtener una mezcla compacta e impermeable.

La utilización de a/c bajas se considera la primera estrategia para desarrollar hormigones impermeables. El desarrollo de hormigones autocompactantes con bajo contenido de agua,

implicaría la utilización de aditivos que ayuden a la reología, aumentando el costo del hormigón y seguramente aumentando las resistencias finales, aspecto que excede las solicitaciones asociadas a una vivienda unifamiliar.

Con respecto a la etapa de diseño de las piezas de hormigón visto, es necesario hacer hincapié en las características propias del hormigón y en una buena calidad de recubrimiento, cuyo espesor queda determinado por norma, dependiendo del ambiente en el que se encuentre la estructura.

Con respecto al aseguramiento de un buen llenado, tanto de la pieza al interior como de su recubrimiento, se entiende que el hormigón autocompactante aporta considerablemente al producto que se pretende obtener. Queda determinada entonces, la necesidad de búsqueda de una dosificación que responda a la reología, sin generar aumentos innecesarios de costos.

Tras el desarrollo de los aspectos de durabilidad del hormigón autocompactante, vemos que leves modificaciones en las dosificaciones determinan respuestas distintas al ingreso de agentes agresivos. Sería interesante ensayar las características de durabilidad de hormigones elaborados en el país. Se manejaría así la certeza de que, más allá de lograr superficies de acabados visualmente perfectos, puedan mantenerse en el tiempo evitando la aplicación de protectores superficiales y la realización de reparaciones puntuales que atenten a la uniformidad visual de la propuesta.

Dada que la disminución de costos en una escala tan pequeña parece quedar sujeta a una buena gestión de los operarios en obra, se podría elaborar un estudio sobre las posibilidades de mejorar los tiempos de desencofrado para aquellos autocompactantes que no responden a altas resistencias. Como limitante se plantea el uso de encofrados racionalizados, por lo cual sería necesario el alquiler de los mismos. En base a los resultados arrojados por el estudio podríamos manejar costos reales por alquileres de encofrados y estudiar las incidencias sobre el costo final.

Resistencia mecánica adecuada y durabilidad son condiciones necesarias, pero no suficientes, para conseguir y mantener cualidades estéticas. Deberán ser considerados los puntos enumerados con respecto al acabado del hormigón asegurando así un mejor resultado en la ejecución de la propuesta. Entre ellos, es primordial asegurar un correcto curado, de no lograrlo se atentaría contra la durabilidad de la pieza.

7. Intercambio

Se plantea un intercambio con personal técnico de dos de las empresas que suministran hormigón en la ciudad de Montevideo, procurando acceder a su opinión con respecto a algunos aspectos que se depredieron en el desarrollo de la temática.

Se explica previo a la entrevista el deseo de intercambio acerca de hormigones de resistencia 30 MPa y su utilización en viviendas unifamiliares.

7.1 Entrevista a técnico de la empresa Hormigones Artigas. Darío Miguez

¿Es viable desarrollar hormigones autocompactantes de la resistencia considerada? La pregunta surge de la consideración del alto contenido de finos que solicita la dosificación y la utilización de cemento portland como filler.

Nosotros suministramos hormigones autocompactantes a partir de resistencia C25.

¿Maneja Hormigones Artigas la posibilidad de incorporar filler calcáreo o similar en sus dosificaciones?

Sí utilizamos, lo suministra nuestra planta de clinker que tenemos en Minas.

Han desarrollado estudios con respecto a la durabilidad del hormigón autocompactante, ¿podría compartir alguna conclusión con respecto a una comparación con un hormigón común de resistencia similar?

Se realizaron estudios por parte de Gemma, tendría que buscar esa documentación al estar en Buenos Aires no accedo a los mismos.

Si fuera viable ajustar la dosificación para asegurar mejoras en la durabilidad, ¿sobre qué aspectos considera válido replantear la dosificación utilizada?

Entiendo que el desempeño de ésta clase de hormigones tiene un mejor desempeño que un hormigón convencional con respecto a la durabilidad.

Se recomienda utilizar encofrados que aseguren la estanqueidad y la resistencia a las presiones que el llenado con autocompactante puede ejercer.

¿En el caso del programa evaluado sería necesario alquilar dichos encofrados, considera pertinente utilizar encofrados tradicionales tomando precauciones de estanqueidad y resistencia?

La experiencia que tuvimos con encofrados tradicionales no fue buena, se terminaban abriendo o tenían pérdidas en varios puntos.

Me proporcionaron los siguientes valores referidos a junio 2019 para hormigón volcado:

C30: \$6357 m³ + iva
AUTOCOMPACTANTE: \$7256 m³ + iva

La diferencia de costos no es tan elevada como imaginaba. Considerando que el producto final a nivel de acabado sería mejor.

Es así, por política de la empresa sólo hemos trasladado el sobre costo en la materia prima al precio final y no un margen mayor por ser un hormigón más complejo.

7.2 Entrevista a técnico de la empresa Concrexur. Carlos Stapff

¿Es viable desarrollar hormigones autocompactantes de la resistencia considerada?

La pregunta surge de la consideración del alto contenido de finos que solicita la dosificación y la utilización de cemento portland como filler.

Sí es posible desarrollar hormigones autocompactantes con resistencia 30 MPa.

Lo único que obstaculiza eso es el tenor de cemento, que es más elevado que para un 30 MPa común, lo que incide en el costo del metro cúbico del hormigón.

¿Maneja Concrexur la posibilidad de incorporar filler calcáreo o similar en sus dosificaciones?

Hemos manejado y lo hemos descartado. Nos llevó a eso la dificultad que implica para nuestras plantas la dosificación y la demora en la carga de los camiones hormigonera.

Al momento de solicitar una guía de precios sobre el valor del metro cubico ofrecen dos productos, autocompactante común y autocompactante con gravilla. ¿Podría definir la diferencia?

La única diferencia es la del tamaño del árido grueso. En el dosificado con pedregullo tiene un valor de 25 mm y el de gravilla tiene un tamaño máximo de 10 mm. El de gravilla debe llevar un tenor de cemento más elevado puesto que las superficies a soldar son mayores.

Han desarrollado estudios con respecto a la durabilidad del hormigón autocompactante, ¿podría compartir alguna conclusión con respecto a una comparación con un hormigón común de resistencia similar?

En cuanto a la durabilidad es de pensar que sea muy similar al del hormigón convencional.

Tenemos ejemplos de edificios hormigonados con MPa 30, alguno de ellos hace más de ocho años.

Si fuera viable ajustar la dosificación para asegurar mejoras en la durabilidad, ¿sobre qué aspectos considera válido replantear la dosificación utilizada?

Tenemos que tener presente lo dicho en el numeral anterior. No sería necesario hacer nada para tener la misma durabilidad que en el hormigón convencional. Se recomienda utilizar encofrados que aseguren la estanqueidad y la resistencia a las presiones que el llenado con autocompactante puede ejercer. ¿En el caso del programa evaluado sería necesario

alquilar dichos encofrados, considera pertinente utilizar encofrados tradicionales tomando precauciones de estanqueidad y resistencia?

Eso depende de la altura del llenado. Una cosa es hasta 50 cm y otra bien distinta es de llenados de 2,50 m. Eso es lo que nos hace pensar en alquiler de encofrados.

8. Conclusiones

En función del desarrollo de la estructura del trabajo se podría considerar que, haciendo foco sobre los aspectos del hormigón de manera de mejorar sus capacidades, desde la mirada de la durabilidad, se debe cuidar: la dosificación, la compactación y el curado de las piezas, influyendo con todos ellos sobre la porosidad del hormigón.

Considerando que la dosificación, entre otros aspectos, juega un rol fundamental en la respuesta al ingreso de agentes agresivos sería pertinente realizar ensayos de permeabilidad al aire y al agua sobre los hormigones que se manejan en el mercado Montevideoano. Se podría de esta manera asegurar conceptos generales que se aplican comúnmente al autocompactante sobre las mejoras en las propiedades de durabilidad con respecto a los hormigones convencionales.

Del intercambio con los técnicos de las hormigoneras se desprende que la durabilidad sería igual o mayor que para hormigones convencionales.

Hormigones Artigas incorpora filler a sus dosificaciones, Concrexur no lo hace. Lograr resistencias medias (30 MPa) no sería un inconveniente.

Considerando la auto compactación del hormigón se aseguraría un mejor llenado de la pieza y un uniforme recubrimiento de las armaduras, sin embargo, sería necesario considerar el sobre costo del alquiler de encofrados que puedan resistir las presiones del llenado. Asumiendo el alquiler, sería pertinente evaluar el llenado de las piezas desde la parte inferior, asegurando que no se incorpore aire a la mezcla durante el llenado. De esta manera los acabados serían

perfectos y la compactación de la mezcla mejoraría con respecto a llenados por la parte superior.

Dado que podemos asegurar con el autocompactante un correcto llenado sin andar pisando armaduras y generando corrimiento de las mismas dentro del encofrado podemos asegurar los espesores planteados en la norma con respecto a la exposición a los agentes agresivos correspondientes.

El curado de las piezas de hormigón visto es esencial para lograr correctos acabados y una correcta hidratación del hormigón de recubrimiento, evitando la interconexión de poros. De todas maneras, este aspecto corre con igual importancia para ambos tipos de hormigón.

La búsqueda de incorporar hormigón autocompactante en la elaboración de viviendas unifamiliares pretende, más allá del aumento de costo inicial, lograr una economía de recursos, generando superficies que no necesiten tratamientos adicionales después del desencofrado.

Como alternativa para evitar el alquiler de encofrados, se podría manipular la dosificación de un hormigón convencional para lograr asentamientos que faciliten el llenado y para

evitar obstrucciones debidas al tamaño máximo de agregado.

El hormigón convencional C30 de Hormigones Artigas maneja valores de agregado de piedra partida de entre 5 y 20mm, con asentamiento de 12 + - 2. Podría modificarse el agregado por gravillín de entre 5 y 14mm, e incorporar aditivo para lograr asentamiento de 18 + -3. Los costos del hormigón aumentarían, aproximándose al costo de hormigón autocompactante. Si se tomara el costo del hormigón convencional C30 como referencia, el salto por la modificación determina un valor de 1.07 con respecto al original y el autocompactante un 1.14.

Queda claro que son muchos los factores que deberían ser considerados al momento de tomar la elección del material. Dependerá de quien tome la decisión los factores que primen. Se reitera, de manera de elegir con propiedad, sería interesante manejar valores claros sobre el comportamiento de los hormigones en mercado.

Agradecimientos

Se agradece a Darío Miguez y a Carlos Stapff por los intercambios realizados.

Referencias

- [1] Traversa, L. P., Villagrán Zaccardi, Y. A. 2010 "Introducción a la Durabilidad y Patologías de las Estructuras de Hormigón Armado" IX Jornada de "Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio", 10.
- [2] Andrade Raharinaivo, Jean Marie R Genin 1986. "Sobre la corrosión de armaduras de hormigón en presencia

de Cloruros" Materiales de Construcción Vol 36 (Oct, Nov, Dic), 15.

- [3] M. H. F. Medeiros, L. V. Real, V. A. Quarcioni, P. Helene. 2015 "Concreto con protección de superficie y expuesto a solución de cloruros: Espesor de recubrimiento equivalente" Alconpat, Vol 5, No 3 (Sep- Dic).
- [4] Abel Castañeda Valdés, Nelson Días Brito, Eva González Mellor, Mileidys Martínez Hernández,

Francisco Corvo Pérez. 2005. "Influencia de la penetración de Iones Cloruros en el Hormigón Armado a diferentes relaciones Agua/Cemento y Condiciones de Exposición" Cenic, Ciencias Químicas, Vol 36, No especial .

- [5] EHE-08, "Instrucción de hormigón estructural", 2008.
- [6] E. B. Bermejo, A. Moragues, J. C. Gálvez, M. Fernández Cánovas 2010 "Permeabilidad y estructura porosa de hormigones autocompactantes de resistencia moderada" Materiales de Construcción Vol 60 (Jul, Sep).
- [7] M. José Escorihuela, Ignacio Menéndez, Fernando Triviño, Francisco Hernández, Norberto Hurtado y M, Antonia Martín 1993 "Influencia del filler calizo en morteros de cemento portland" Materiales de Construcción Vol 43 (ene, feb, marzo).

[8] E. F. Irassar, V. L. Bonavetti, G. Menéndez, M. F. Carrasco 2015 "Hidratación y propiedades de cemento ternarios con Filler Calcáreo y escoria" Alconpat, Vol 5, No 2 (May- Ago).

- [9] S. Teixeira, A. Santilli, I. Puente 2016 "Optimización del tiempo de desencofrado en piezas verticales de Hormigón Autocompactante" Memoria Investigaciones en Ingeniería, núm 14.
- [10] S. Teixeira, 2016 "Optimización del tiempo de desencofrado en piezas verticales de Hormigón Autocompactante: Desarrollo de metodología y estudio experimental.", PhD. Thesis. Univ. Navarra.
- [11] J. Cariñera, 2014 "Superficies de hormigón arquitectónico encofrado in situ", Master Thesis. Univ. Politecnica de Madrid.

HAD y HAC: incidencia en la reducción de indicadores de insustentabilidad en obras de arquitectura

Valeria Karina Esteves Garella¹

1. e-mail: valeriaesteves.arq@gmail.com

Palabras clave: Indicadores de sustentabilidad, reducción de consumo de recursos no renovables, reducción de consumo de agua, hormigones de alto desempeño, hormigones autocompactantes.

Key words: sustainability indicators, reduction of non-renewable resources, reduction in water consumption, high performance concrete, self compacted concrete.

Resumen: El presente trabajo muestra las características de los hormigones especiales: Hormigón de Alto Desempeño (HAD) y Hormigón Autocompactante (HAC), que colaboran con mejorar los indicadores de sustentabilidad ambiental en la industria de la construcción en Uruguay. Aportan a reducir el consumo de materiales de extracción, no renovables, de los que la industria de la construcción en Uruguay es responsable en el entorno del 58%; reducen el consumo de agua para su elaboración (agua de amasado), reducen el vertido final de residuos industriales o de producción agropecuaria, a través de la incorporación de los mismos como insumos que sustituyen a los de extracción no renovables, promueven la reducción en la energía incorporada de los materiales que los componen, así como de las emisiones de CO₂ equivalente.

Se mencionan valoraciones en relación a la durabilidad, vida útil, requerimiento de mantenimiento e incremento en tiempo de uso. No se realizan valoraciones en relación a disposición final o posibilidades de reciclaje de los mismos. Tales características se observan comparativamente a los consumos y emisiones del Hormigón Convencional (HC). De acuerdo a las metas de la Agenda 21, y los conceptos de “construcción sostenible” la reducción de los indicadores considerados, es un objetivo a alcanzar.

Abstract: The present work takes a look on High performance concrete (HPC) and Self compacting concrete (SCC) main characteristics which cooperate with sustainability indicators improvement at building industry in Uruguay, by means of: reduction of non-renewable resources consumption, of which, in Uruguay, the sector is responsible of about 58%, reduction in water consumption to elaborate and cure it, reduction, by means of incorporating as substitute resources, the wastes coming from other industries, the reduction of embodied energy in its composite materials, as well as equivalent CO₂ emissions. Observations on durability, life span, maintenance requirements and increase of period of use, are mentioned. Observations on final disposal or after reuse are not considered. The characteristics are compared to HC ones. According to the goals proposed by the Program 21, and “sustainable building” concepts, the reduction of the mentioned indicators, is an objective to approach.

1. Introducción

La industria de construcción en el Uruguay es responsable del entorno del 58% del consumo de recursos no renovables (de extracción) [1], y a nivel global, del 40% del consumo de energía [2] y 40% de residuos volcados.[3] En obras de arquitectura, los hormigones son responsables de gran parte de dichos consumos a causa de su incidencia en el consumo total de materiales de extracción no renovables, especialmente para elaboración de estructuras resistentes o viales, y consume el 33.65% de la energía de los materiales de obra[4]. Además la industria del cemento carga entre un 5% y un 7% de las emisiones de CO₂. [5][6].

Las metas a atender en la Agenda 21[7] y los conceptos de “construcción sostenible” definidos por Kilbert (1994)[8], Casado (1996)[9] o Lanting (1996) [10], y la Agenda 21 sobre construcción sostenible(1999)[3], proponen la reducción de consumos, así como también, la adhesión al Protocolo de Kyoto [11] propone la reducción de emisiones de CO₂ equivalente en los procesos productivos.

Los hormigones de alto desempeño (HAD) y los hormigones autocompactantes (HAC) son productos tecnológicos que representan parte de los avances realizados en el sentido de alcanzar las metas mencionadas, en comparación con los hormigones convencionales (HC), en tanto su utilización acarrea reducción en los consumos no renovables y posibilita la inclusión de residuos de otras cadenas productivas en su composición. Según Aitcín: “Es sencillo de demostrar que actuando contra la misma carga, una columna de resistencia de 75 MPa es más sostenible que una de 25 MPa: solamente es necesario el uso de tres veces menos agregados y dos veces menos cemento cuando se usa la de mayor resistencia.” [12]

En el medio local, se han realizado esfuerzos para disminuir la incidencia de indicadores de insustentabilidad [3] en la construcción de obras de arquitectura, dada la incidencia de esta industria en el consumo de recursos no renovables,

sean materiales de extracción, agua o energía, así como en cuanto a emisiones de CO₂equivalente. Algunos de los avances se relacionan con la fabricación de cementos y los hormigones producidos en Uruguay.

2. Estudio comparativo

De acuerdo a los estudios presentados por Mimbacas en 2012[1], existió una tendencia creciente en el uso de minerales no renovables, (de extracción), en Montevideo desde el año 2002 al 2009. El consumo de minerales no renovables representó el 80% del consumo total de materiales en ese período, y la industria de la construcción consumió en promedio un 58% de ellos, mostrando la relevancia de su impacto en tal consumo. Mimbacas concluye que la industria de la construcción en Uruguay posee un alto potencial de reducción del consumo de minerales no renovables. En el mismo estudio, muestra una ampliación en un 30% aproximadamente, de las áreas de extracción de materias primas, durante ese período.

Por su parte, Casañas (2011)[2], aporta datos en relación al consumo global de energía en la industria de la construcción, del orden del 40%, de los cuales, para el caso de España, el cemento representa un 10.95% y el acero un 23.78% (el dato de acero que calculó para el caso de Uruguay se asemeja al español, mientras que el del cemento lo supera); las emisiones de CO₂ equivalente que presenta en relación al cemento portland (C.P.) producido en Uruguay, significan un 91.8% del sector de procesos industriales (5.8% del total nacional), datos que cita del informe “Geouruguay 2008.”[13].

Peluffo (2011)[4], muestra que para el caso de edificio en altura en Montevideo estudiado en su tesis, el hormigón estructural representó el 33.65% del consumo de energía incorporada del total de materiales de 1m² de construcción convencional.

Las definiciones de “construcción sostenible” primarias de Kilbert (1994)[8], Casado (1996) [9] y Lanting (1996)[10], que fueran retomadas con mayor precisión por la “Agenda 21 sobre

construcción sostenible” (1999)[3], proponen como indicadores de medición de la misma, entre otros: la reducción del consumo de materiales de extracción, no renovables, la reducción del consumo de agua, la incorporación de residuos de otras cadenas productivas como insumos, reducción en la energía incorporada de los materiales, así como de las emisiones de CO₂ equivalente. Los mismos son retomados por ISO:ISO14044:2006 (es) [14] e ISO 14046:2014(es). [15].

Los acuerdos internacionales como la Agenda 21[7], Agenda 21 sobre construcción sostenible[3] o Protocolo de Kyoto [11], a los que Uruguay suscribe, hablan sobre avanzar en medidas concretas para minimizar impactos y conducir hacia la mejora de indicadores de sostenibilidad en los medios locales.

Para el caso de los HAD, algunas de sus características, que hacen a la obtención de mayores valores de resistencias y mejores condiciones de durabilidad, también conducen a un material con mejoras en los indicadores de sostenibilidad en relación al H.C, principalmente en cuanto a la reducción de consumo de recursos naturales de extracción, de energía incorporada y de consumo de agua, así como reducción en emisiones de CO₂ equivalente.[12].

Al lograrse hormigones con mayores resistencias, la experiencia indica que se posibilita la reducción de las dimensiones de piezas estructurales, con la consecuente reducción de metrajes de hormigones vertidos, es decir, menores cantidades de materiales (recursos de extracción no renovables: áridos y fabricación de cemento), energía y agua insumidos, así como de emisiones de CO₂ equivalente; resultantes tanto de la fabricación del cemento como de transporte de volúmenes; en algunos casos, significando esta reducción de dimensiones, un 50% del área de la sección para el caso de la ampliación de Victoria Plaza por ejemplo, en los pilares, es decir un 50% del hormigón vertido.

Si bien el consumo de C.P. es mayor en un entorno del 50% en las dosificaciones, una reducción de

las secciones a 1/3, redundan en un ahorro del 50% del volumen de C.P. para lograr resistencias 3 veces mayores. (datos aportados en diapositivas de clase).

Asimismo se habilita la reducción de la cuantía de armaduras utilizadas para cada pieza, (de 4% a 1.23%, el 30%, según diapositivas de clase, cuya producción involucra alto consumo energético, significando el acero, uno de los materiales con mayor energía incorporada de los utilizados en construcción de edificios [2].

En cuanto a la durabilidad, al ser hormigones menos porosos, y en consecuencia menos permeables al vapor de agua, y al acceso de la misma a la masa, es posible que se incremente su vida útil, significando además disminución de inversión en mantenimiento e incrementando el tiempo de uso, lo cual desde el punto de vista de la Evaluación de Ciclo de Vida (ECV)[14], significa una mejora en los 3 indicadores.

Tanto el aumento de resistencia, como de durabilidad, vienen dados, en parte, por la reducción de la relación agua/cemento (alcanzando valores menores a 0.3) y por adiciones activas (sílice activa, ceniza de cáscara de arroz, etc.), en el orden de 10% del peso del cemento; y también, en parte, por la adición de químicos aditivos, que pueden permitir un aumento de resistencia de aprox. un 10% de acuerdo a diapositivas de clase.

Por su lado, la disminución de la relación agua/cemento, conduce a menor consumo de agua de amasado, siendo aprox. la mitad que la utilizada en H.C, lo que favorece el indicador de “huella hídrica” [15][16]. Si bien se precisa una relación agua/cemento de al menos 0.42 para el máximo porcentaje de hidratación del cemento (70% aproximadamente) y adiciones, [17], agua que habitualmente se adiciona como agua de curado; al haber indicios de retracciones autógenas aun tomando las precauciones necesarias de curado [12][17], han surgido propuestas de incluir esa diferencia de agua en el interior de la masa del hormigón, a través del “autocurado” o “curado interno” [18], posibilitando aportar a un control diferente de las cantidades de agua

totales adicionadas en la masa de hormigón. Esto contribuye a realizar un mejor control del indicador de consumo total de agua.

Por otro lado, las adiciones puzolánicas, con capacidad activa, colaborantes en el aumento de resistencia, muchas veces (con excepción de las cenizas puzolanas de volcanes, naturales) son residuos de otras industrias, (sílice activa, escoria de altos hornos enfriadas rápidamente, cenizas volantes, cenizas de cáscara de arroz) lo que implica la reducción del consumo de materias de extracción especialmente para producir las, así como también de energía, agua o emisiones de CO₂ equivalente de producción del C.P. Además, el encontrar dichos residuos un uso en la industria de la construcción, permite cerrar el ciclo de materiales, de acuerdo a los conceptos de “economía circular” y “economía azul” [19] y resolviendo la eliminación de residuos a las cadenas productivas de las que provienen.

En cuanto a los aditivos químicos, de los que SIKKA realizó un estudio de la medida en que colaboran con disminuir indicadores de insustentabilidad en la producción del hormigón [20], pueden colaborar en la reducción de hasta un 20% del consumo de agua en la elaboración de los hormigones autocompactantes, además de colaborar en reducir la porosidad [21]. Los naftalenos sulfonados son resultantes del proceso de refinado del carbón, mientras que los melaminas sulfonados están basados en polímeros sintéticos. [21]

En cuanto a los cementos utilizados, existen avances locales que muestran que adiciones puzolánicas de residuos de otras industrias, agregados como fillers activos a los mismos, permiten reducir el consumo de materias primas, energía y agua en su fabricación: ceniza de cáscara de arroz, sustituyendo entre 10% y 20% el volumen de C.P, obteniéndose mejores resultados con la ceniza de quema controlada [22][5], y ceniza de bagazo de caña, con mejoramiento de las condiciones de obtención natural mediante molienda y quema complementaria, sustituyendo entre 5% y 15% el volumen de C.P. [23]; de acuerdo con lo planteado por Francisco Soria Santamaría, 1983: “...en el

caso del cemento... Finalmente, la solución más inmediata y más amplia para ahorrar combustible (energía térmica) es incorporar adiciones activas al producto en su fase final de preparación, tal como ha manifestado recientemente la Agencia Internacional de la Energía y Grupos de Expertos reunidos con este fin.” [24]

Otros avances locales muestran la caracterización de residuos de minería con la posibilidad de su utilización como árido grueso en hormigones [25]. El estudio muestra también cómo se han sustituido áridos finos y gruesos en otros ámbitos, así como datos que aportan Aitcin y Mindess, 2011.

Para el caso de los HAC, si bien no es un requisito la reducción de la rel. a/c, para su producción, es habitual que se practique, (ejemplos locales entorno de 0.4). Sí es un requisito básico la reducción de áridos finos sustituidos por partículas de menor granulometría, máx. 0.063mm un 70%, (finos no activos), siendo provenientes, en casos, para el medio local, de residuos de producción del cemento portland (polvo retenido en los electrofiltros), o en otros casos, obteniéndose de la molienda de piedra caliza hasta la granulometría requerida. Para estos casos se verifica una reducción de insumos de extracción no renovables, de aprox. 30% [26], en favor de la inclusión de residuos de otras cadenas, significando el cierre del ciclo para las mismas.

Por otro lado, en cuanto a los áridos gruesos, siendo requisito su tamaño máximo (t.m.a) no mayor a 19mm, dependiendo del lugar y métodos de extracción, es posible que se utilicen residuos de extracciones en algunos casos, y en otros casos puede involucrar la re-molienda del pétreo disponible, existiendo consumo de energía para realizarlo. En éstos últimos casos queda pendiente la verificación de la reducción del indicador de energía incorporada, y de emisiones de CO₂ equivalente.

3. Consideraciones Finales

De las observaciones comparativas surge que para el caso de los HAD, la generalidad de sus

características, así como las de sus procesos de producción, conducen a una reducción de los indicadores de insustentabilidad: consumo de materiales de extracción no renovables, de energía y agua, emisiones de CO₂ equivalente, y mejora de indicadores de sustentabilidad: utilización de residuos de otras cadenas productivas, y las asociadas a la durabilidad (posible incremento de vida útil, reducción de mantenimiento, mayor tiempo de uso); mientras que para el caso de los HAC, algunas de sus características conducen a una reducción de los indicadores de insustentabilidad: reducción de volúmenes vertidos que reducen los materiales utilizados, sustitución de parte de los áridos por finos que surgen como residuos de otras industrias, reducción del consumo de agua por el uso de aditivos químicos que lo habilitan; mientras que otras de sus características no necesariamente significan mayor sustentabilidad, como es el caso de una mayor molienda para los agregados gruesos, y las altas dosificaciones de cemento.

Referencias

- [1] Mimbacas, A. 2012. “Caracterização do consumo doméstico de materiais da cidade de Montevideu mediante análise de fluxos de materiais.” Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2012. Acceso: http://www.fadu.edu.uy/sepep/autor/mimbacas-alicia/?silverghyll_tpicker=autores%3Dmimbacas-alicia.
- [2] Casañas, V. 2011. “La energía como indicador del impacto ambiental en los sistemas constructivos conformados a partir de materiales de producción nacional.” Tesis (Maestría) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2012.
- [3] Agenda 21 on sustainable construction. C.I.B. Report Publication 237. 1999. Acceso: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB4675.pdf>
- [4] Pelufo, P. 2011. “Análisis de la energía incorporada de un edificio en altura en Uruguay.” Tesis (Maestría) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola

de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2011.

- [5] De Sensale Rodríguez, G, Rodríguez, I. 2018 “A study on blended Portland cements containing residual rice husk ash and limestone filler.” Construction and Building Materials Volume 166, 30 March 2018, Pages 873-888. Acceso: <https://www.sciencedirect.com.proxy.timbo.org.uy:88/science/article/pii/S0950061818301387?via%3Dihub#!>
- [6] Cerutti, F. and Santilli, A. 2017. “En camino hacia un hormigón sustentable: Uso de cementos puzolánicos en Uruguay” Memoria Investigaciones en Ingeniería, núm. 15 (2017) ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106.
- [7] Programa 21. O.N.U. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. División de desarrollo sostenible. Acceso: <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21toc.htm>
- [8] Kibert, 1994. “La Construcción Sostenible deberá entenderse como el desarrollo de la Construcción tradicional pero con una responsabilidad considerable con el Medio Ambiente por todas las partes y participantes. Lo que implica un interés creciente en todas las etapas de la construcción, considerando las diferentes alternativas en el proceso de construcción, en favor de la minimización del agotamiento de los recursos, previniendo la degradación ambiental o los prejuicios, y proporcionar un ambiente saludable, tanto en el interior de los edificios como en su entorno.” Acceso: <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n4/apala.html>
- [9] Casado, 1996: “La Construcción sostenible, que debería ser la construcción del futuro, se puede definir como aquella que, con especial respeto y compromiso con el Medio Ambiente, implica el uso sostenible de la energía. Cabe destacar la importancia del estudio de la aplicación de las energías renovables en la construcción de los edificios, así como una especial atención al impacto ambiental que ocasiona la aplicación de determinados materiales de construcción y la minimización del consumo de energía que implica la utilización de los edificios”. Acceso: <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n4/apala.html>

- [10] Lanting, 1996. "La Construcción Sostenible se dirige hacia una reducción de los impactos ambientales causados por los procesos de construcción, uso y derribo de los edificios y por el ambiente urbanizado." Acceso: <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n4/apala.html>
- [11] Ley 17279. "Apruébase el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático suscrito en Kyoto, en la fecha que se determina." Acceso: <https://legislativo.parlamento.gub.uy/temporales/leytemp2592114.htm>
- [12] Aitcin, P-C. "Concreto de alto desempeño. Ciencia y tecnología". Quebec: Universidad de Sherbrooke, Canadá. p.12
- [13] "GeoUruguay 2008." DI.NA.MA-CLAES-PNUMA. Acceso:<http://www.mvotma.gub.uy/component/k2/item/10002533-informe-geo-uruguay-2008>
- [14] ISO 14044:2006(es) "Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices" Acceso: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>
- [15] ISO 14046:2014(es) "Gestión ambiental — Huella de agua — Principios, requisitos y directrices" Acceso: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14046:ed-1:v1:es>
- [16] Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y. 2004. "Water footprints of nations." Volume 1 Main Report, Value of water. Research report series. No16. UNESCO-IHE. Acceso: <https://waterfootprint.org/media/downloads/Report16Vol1.pdf> "The water footprint of a country is defined as the volume of water needed for the production of the goods and services consumed by the inhabitants of the country. Closely linked to the water footprint concept is the virtual water concept. Virtual water is defined as the volume of water required to produce a commodity or service."
- [17] Giani, R, Navarrete, B, Bustos, J. 2008, "La Retracción Autógena y su Relación con la Tendencia a la Fisuración a Temprana Edad en Pavimentos de Hormigón." Revista de la Construcción [en línea] 2008, 7 (Sin mes) : [Fecha de consulta: 11 de junio de 2019] Acceso: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127612584006>> ISSN 0717-7925
- [18] López, M. 2005 "Curado interno en hormigones de alto desempeño - un nuevo paradigma = Internal curing in high performance concretes - a new paradigm." Revista ingeniería de construcción. Vol. 20, no. 2 (ago. 2005), p. 117-126 Acceso:<https://repositorio.uc.cl/handle/11534/10152>
- [19] Pauli, G. 2011. "La economía azul" Acceso:<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/admon/files/empresas/ZW1wcmVzYV83Ng==/imagenes/4071/La%20Economia%20Azul%20-%20Gunter%20Paili.pdf>
- [20] SIKA. "Hormigón: Soluciones sostenibles mas valor menos impacto." Acceso: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Construcciones%20Sostenibles%20de%20hormigon%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Construcciones%20Sostenibles%20de%20hormigon%20(1).pdf)
- [21] Cremades, S. 2011. "Estudio de la robustez en el hormigón autocompactante con bajo contenido de finos" Tesis (Grado) -- Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Acceso:<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13096/PROYECTO%20PFG%20SERGIO%20CREMADES%20ESCRIG.pdf?sequence=1>
- [22] De Sensale Rodríguez, G. 2000. "Estudo comparativo entre as propriedades mecánicas dos concretos de alta resistencia e convencionais com cinza de casca de arroz." Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, NORIE, Núcleo Orientado para Inovacao da Edificacao. Porto Alegre, BR-RS. Acceso:http://www.fadu.edu.uy/sepep/autor/rodriguez-gemma/?silverghyll_picker=autores%3Drodriguez-gemma
- [23] Ruchansky, A. 2011. "Posibilidades del uso de la ceniza de bagazo de caña, como adición mineral al cemento Portland en Uruguay." Tesis (Maestría) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2011.
- [24] Soria Santamaría, Francisco, 1983, "Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción*" Materiales de Construcción N.º 190-191 -1983 Acceso: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/974-1112-4-PB%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/974-1112-4-PB%20(1).pdf)
- [25] Tomeo, F. 2012. "Caracterización del residuo pétreo de la industria minera del oro para la producción del Hormigón en Uruguay." Tesis (Maestría) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2012. Acceso:http://www.fadu.edu.uy/sepep/autor/tomeo-suarez-fernando-daniel/?silverghyll_picker=autores%3Dtomeo-suarez-fernando-daniel
- [26] Rodríguez, I., Aguado, A., Rodríguez, G. 2012 "Self-compacting concrete of medium characteristic strength." Construction and Building Materials Volume 30, May 2012, Pages 776-782. Acceso: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.070> de 2019] Acceso: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127612584006>> ISSN 0717-7925
- [18] López, M. 2005 "Curado interno en hormigones de alto desempeño - un nuevo paradigma = Internal curing in high performance concretes - a new paradigm." Revista ingeniería de construcción. Vol. 20, no. 2 (ago. 2005), p. 117-126 Acceso:<https://repositorio.uc.cl/handle/11534/10152>
- [19] Pauli, G. 2011. "La economía azul" Acceso:<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/admon/files/empresas/ZW1wcmVzYV83Ng==/imagenes/4071/La%20Economia%20Azul%20-%20Gunter%20Paili.pdf>

Controles que se realizan a los hormigones autocompactantes y sus componentes en planta de producción

María Elena Reolon Alvarez¹

1. e-mail: elenareolon@gmail.com

Palabras clave: autocompactante, ensayos, agregados, aditivos, calidad.

Resumen: En la planta de elaboración de “Hormigones Artigas” la estrategia comercial apunta a la obtención de un hormigón autocompactante de alta calidad. Como parte de esta política se realizan rigurosos ensayos a los materiales utilizados para componer las mezclas. Luego de elaborado el producto otra serie de análisis (unos realizados antes de que salga el camión mixer rumbo al lugar donde se va a colocar el hormigón y otros realizados en el lugar de disposición final previo al llenado), permiten verificar que el producto suministrado no solo cumple con lo solicitado por el cliente sino que cumple con exigentes parámetros de calidad fijados por la empresa.

Key words: self-compacting concrete, essays, aggregates, additives, quality.

Abstract: In the production plant of “Hormigones Artigas” the commercial strategy aims to obtain a self-compacting concrete of high quality. As part of this policy, rigorous tests are carried out on the materials used to compose the mixtures. After the product was elaborated another series of analyzes (some made before the mixer truck leaves for the place where the concrete is going to be placed and others made in the place of final disposal prior to filling), allow to verify that the product supplied does not it only complies with what is requested by the client, but meets stringent quality parameters set by the company.

1. Introducción

Para ofrecer al mercado un producto de calidad las empresas dedicadas a la elaboración de hormigón premezclado deben realizar estrictos controles: a los insumos para la elaboración del hormigón, al proceso de producción del mismo y al producto elaborado. Esto asegura que el hormigón dispuesto a pie de obra además de ser el solicitado por el cliente cumple con toda la normativa técnica relativa al tema.

En la planta de producción de hormigones premezclados de “Hormigones Artigas” situada en camino Oncativo No. 2982 (Montevideo), además de producirse hormigón del tipo convencional se

producen hormigón especiales. Uno de ellos es el hormigón autocompactante.

El hormigón autocompactante se define como aquél que es capaz de fluir y rellenar cualquier sector del encofrado, a través de las armaduras, simplemente por la acción de su propio peso. Esto se debe no solo a la adecuada dosificación de la mezcla, sino además a la incorporación de aditivos químicos. Sus características principales son la fluidez, la viscosidad y la cohesión.

Este tipo de hormigón, para la empresa es considerado (por su volumen y frecuencia de

producción) como un producto “de línea”. Según se nos informó la apuesta es brindar al mercado un hormigón de dosificación “robusta”: un producto que cumpla con todos los requisitos para ser un hormigón autocompactante, atendiendo a criterios de calidad más que de competitividad económica. En la actualidad la demanda de este tipo de hormigón la componen principalmente obras de conjuntos de vivienda con muros de hormigón (elementos modulares de pocos centímetros de espesor) y obras de ingeniería civil en general.

Este tipo de hormigón es adecuado para todos los usos que requieran:

- Compactación mínima y no permitan el vibrado del hormigón.
- Rápida colocación del hormigón con mayor rendimiento de la mano de obra y poco uso de equipos.
- Muy buena calidad de terminación.
- Piezas densamente armadas.
- Recomposición y refuerzo de elementos

Trata el presente trabajo de la enumeración y descripción de los ensayos que se realizan en la planta de elaboración de hormigón premezclado de “Hormigones Artigas”:

- a los componentes para la elaboración del hormigón autocompactante.
- al hormigón autocompactante propiamente dicho. En este caso veremos ensayos que se realizan en el laboratorio de la planta de producción y ensayos que se realizan a pie de obra. También distinguiremos entre ensayos al hormigón en estado fresco y en estado endurecido.

2. Ensayos a los elementos componentes.

Parte fundamental para la obtención de un hormigón de altas prestaciones es la selección de sus elementos componentes. Este punto se considera crítico para obtener un producto con las características esperadas y la durabilidad adecuada.

Figura 1 - Propiedades del “CPC 40 Artigas” a granel (valores medios de junio - julio de 2018).

Requisitos físicos	Unidad	Requisitos UNIT		Artigas CPC 40 G
		Mínimo	Máximo	
Finura	Retenido sobre tamiz 75 µm	%	-	15
	Retenido sobre tamiz 75 µm	%	-	-
	Superficie específica Blaine	m2/kg	250	
Tiempo de fraguado	Inicial	Minutos	60	-
Resistencia a compresión	1 día	Mpa	-	-
	2 días	Mpa	10	-
	7 días	Mpa	-	-
	28 días	Mpa	40	60
Expansión de autoclave		%	-	0,8
Agua de pasta Normal		%	-	-
Requisitos químicos				
Residuo insoluble		%	-	-
Óxido de magnesio		%	-	-
Pérdida por calcinación		%	-	-

Por este motivo se realizan análisis al cemento pòrtland, a los áridos, al agua de amasado, a las adiciones y a los aditivos.

2.1 Cemento Pòrtland.

En este caso se presenta la particularidad de que el cemento pòrtland que se utiliza es producido por la propia empresa en su planta de Minas (“CPC 40 Artigas”). Allí se obtiene clínker mediante el proceso de producción por vía seca; el clínker obtenido junto con pequeñas cantidades de yeso, se muele en la planta ubicada en Sayago (Montevideo). La composición química del cemento pòrtland que se está produciendo se obtiene en la planta de elaboración de hormigón en Montevideo en tiempo real, ya que los laboratorios de toda la empresa están conectados “on line”. El cemento pòrtland obtenido cumple con lo prescrito para ese material por la norma UNIT 20:2017, como se observa en el cuadro de las propiedades del “CPC 40 Artigas” a granel (Fig.1).

2.2 Áridos gruesos y finos.

Para la producción de cualquier tipo de hormigón es fundamental la forma, el tamaño y la resistencia de los áridos.

El primer paso en la recepción de los áridos en planta es la evaluación del grado de limpieza de los mismos. El primer control es el análisis visual que realiza “el pallero”, quien por estar entrenado en la recepción y acopio de los áridos, tiene la suficiente experticia para determinar por simple inspección visual cuando el árido no es el adecuado para la producción de hormigón (está mezclado con sustancias orgánicas, arcillas, etc.). El camión que pasa este primer control de calidad, recién estará en condiciones de que se le tomen muestras del árido que transporta para proceder al “Ensayo con líquido floculante” y de “Granulometría por tamices”.

El primero se hace habitualmente a los áridos finos; se coloca una muestra en una solución floculante y no pueden quedar un porcentaje de retenidos mayor a un 20% (impurezas) luego de

que la solución estuvo en descanso un período de 30 minutos. (Fig. No. 1). Este análisis no se realiza en las filiales de la empresa ubicadas en Argentina.

Para el ensayo de “Granulometría por tamices”, el procedimiento consiste en:

- Toma de muestras.
- Secado de la muestra en horno.
- Pesado de la muestra seca.
- Tamizado según norma.
- Peso de retenidos parciales.

La gradación de los agregados se realiza según el procedimiento especificado en la Norma UNIT-NM 248:2002 (Agregados. Determinación de la composición granulométrica). Mediante el tamizado y con los porcentajes retenidos en los diferentes tamices se calculará el MF (módulo de finura) para el agregado fino y el TM (tamaño máximo) para el agregado grueso.

El proceso de secado es similar para el cualquier tipo de árido, solo que para los áridos gruesos la muestra se seca en un horno y para las arenas la muestra se seca en un aparato.

En la planta se reciben normalmente áridos gruesos (piedra partida de cantera, etc.) y áridos finos (arena fina, arena gruesa, etc.). Los áridos gruesos utilizados para la producción de hormigón son básicamente piedra partida de tres tamaños: 5/14, 5/20 y 20/30. Para la producción de hormigón autocompactante se utilizan los dos primeros tipos de árido grueso (5/14 y 5/20). En algún caso y a pedido del cliente se han realizado dosificaciones empleando pedregullo o pedregullín de tamaño 5/10.

Generalmente se trabajan con los mismos proveedores (“Cantera Montevideo”). Es por ese motivo que algunos tipos de ensayos que se realizan solo cuando hay un cambio de proveedor, lo que significa que variará la procedencia del árido. Tan importante es la calidad del material que se propone suministrar que no se hace ningún acuerdo de tipo económico, hasta que no se compruebe la calidad del árido ofrecido (muestras) y se inspeccione la cantera.

En estos casos se realiza además otro tipo de ensayos en laboratorios externos a la planta para ver los componentes presentes en la muestra (petrografía). Una petrografía es un estudio que determina la composición mineralógica de los áridos, su aspecto y estructura.

Uno de los ensayos más importantes que se realizan en la planta a los áridos de nuevos proveedores y cada tres años a los proveedores habituales es el ensayo "RAS" (reacción álcali-sílice). Los resultados de este ensayo son tan importantes que determinarán la aceptación o el rechazo del proveedor. En "Hormigones Artigas" se emplea el "método acelerado del prisma de hormigón". Este ensayo mide mediante la expansión de prismas normalizados de mortero la reactividad alcalina de los agregados, la que se deberá de ubicar dentro de determinados valores. El ensayo consiste en elaborar probetas prismáticas de pasta de cemento con el agregado bajo estudio. A las 24 horas se desmoldan las probetas, se miden, se pesan y se recubren con una tela saturada de algodón y film de polietileno. Las probetas colocan en agua desmineralizada y a su vez dentro de otro recipiente con agua en su parte inferior que no

moje la probeta. Todo se lleva a una cámara a 60°C. Se realizan medidas a las 5, 8, 10, 13, 15 y 20 semanas. Al terminar el estudio se realiza la observación de la superficie de las probetas y el análisis petrográfico. Cuando existe reacción álcali-sílice se ve la formación de gel en las caras de la probeta.

Luego de que los áridos son aceptados y catalogados según su tipo y granulometría, son dispuestos en la playa de acopio a cielo abierto. Varias veces en el día se les realizan análisis de contenido de humedad. Este dato es sumamente importante ya que el laboratorio suministrará este dato a la planta de dosificación para que se realice el ajuste respectivo de la dosificación.

2.3 Agua de amasado.

El agua para la elaboración de los hormigones es extraída de un pozo semi-surgente ubicado en el mismo predio de la planta. Cabe destacar también que el piso de la planta es impermeable (contrapiso de hormigón) y por su diseño de pendientes permite la recolección de toda el agua de lavado de los camiones en piletas. Esta posteriormente



Figura 2 - Ensayo de extensión de flujo.



Figura 3 - Ensayo caja en L.

formará parte del agua de amasado. Esta medida se realiza para impedir la contaminación del suelo, pero también significa el aprovechamiento de un agua enriquecida con cemento pórtland.

2.4 Aditivos.

Los aditivos para la producción del hormigón autocompactante son en su totalidad proporcionados por la empresa Sika.

Se utilizan:

- "Viscocrete Artigas" (retardante).
- "Viscocrete 6" (superplastificante).
- "Sikament 1-2-3" (mejorador de la cohesión).

En este caso como se trata de productos certificados no se realiza ningún tipo de análisis en la planta al producto suministrado.

La empresa Sika, es quien se encarga como proveedor de, una vez al mes analizar muestras del "CPC 40 Artigas" para ajustar la composición química del aditivo superplastificante a las variaciones que pueda tener el cemento en su composición. Este ajuste es fundamental en virtud de la necesaria compatibilidad que debe de existir cemento-aditivo.

De igual manera se procede cuando se va a proveer un nuevo aditivo para el hormigón o hay variaciones en la composición de éste.

2.5 Adiciones.

Como adición se utiliza el 'polvo de electrofiltro' que proporciona la planta de producción de cemento pórtland ubicada en Minas. Se trata de piedra caliza común molida muy fina. Como no se la considera un producto, sino un residuo de la producción del cemento pórtland, no se le

realizan muchos análisis de caracterización. Este filler de naturaleza calcárea afecta favorablemente las propiedades físicas de los hormigones, aumentando su trabajabilidad y la retención de agua y disminuyendo la fisuración.

Para evitar los efectos de la retracción del hormigón a temprana edad se adicionan (a sugerencia de los técnicos de la empresa o a pedido del cliente) fibras. Las fibras son filamentos finos y largos en forma de haz, malla o trenza de un material natural o manufacturado que se le puede agregar al hormigón en estado fresco con el objeto de disminuir los efectos de la retracción por fraguado, aumentar la resistencia al fraguado y a la fatiga. En el caso concreto de esta planta de elaboración de hormigón premezclado, estas pueden ser “pelo de conejo” o fibras de acero.

3. Ensayos al producto elaborado.

3.1 Ensayos al hormigón autocompactante en estado fresco.

Los ensayos que se realizan comúnmente al hormigón elaborado en estado fresco son:

- Ensayo de extensión de flujo.
- Caja en “L”.
- Anillo “J”.

Los dos primeros ensayos enumerados se consideran fundamentales para verificar la calidad del producto. Según sus resultados se sabrá su capacidad para colarse entre armaduras y si existe exudación y segregación en la mezcla. Tal es la importancia de ellos que si uno de estos ensayos no da resultados satisfactorios no se realiza el tercer ensayo (Anillo “J”).

Cuando se realizan estos ensayos a pie de obra, para la recolección de la muestra a ensayar se deja que se descargue aproximadamente 1 m³ de hormigón. La muestra se extraerá con un balde o en una carretilla humedecida para no alterar la cantidad de agua presente en la muestra.

a) Ensayo de extensión de flujo.

Por la poca cohesividad de este tipo de hormigones no se puede realizar el ensayo de Cono de Abrams para determinar la consistencia de la mezcla.

El instrumental para la realización de este ensayo es el mismo utilizado para realizar el ensayo de consistencia en un hormigón convencional. En este caso se llena el cono con el hormigón sin picado con varilla, para luego levantarse con una velocidad constante y en dirección vertical. Lo que se mide no es el descenso de la muestra sino el tiempo que tarda en alcanzar un diámetro de 50cm. Luego se deja que siga extendiéndose el círculo para cuando la expansión cese medir el diámetro de la muestra.

En estado fresco el flujo debe alcanzar los 50cm en un tiempo de 6 a 9 segundos y el diámetro final de la muestra debe estar entre los 55cm y los 75cm. El valor que se considera óptimo es de 70cm, obtenido del promedio de varios diámetros de la muestra. Este valor es el que asegura que se trata de un hormigón autocompactante (Fig. 2).

Mide la capacidad de llenado y la resistencia a la segregación.

b) Caja en “L”.

El instrumento utilizado para realizar este ensayo y que le da su nombre se basa en una caja horizontal que en uno de sus extremos tiene una columna de sección rectangular. Ambas partes se comunican mediante una ventana situada entre ambas en donde se encuentra dispuesta a simulando hierros de una armadura, varillas metálicas. El ensayo consiste en que cuando la ventana se abre se mide el tiempo en el que la mezcla demora en alcanzar el final de la caja.

Como el dispositivo se colocó en una superficie perfectamente nivelada se mide la distancia de la superficie de la mezcla al borde de la caja horizontal la que debe ser similar como indicador de su fluidez (Fig. 3).

Mide la capacidad de paso entre armaduras y la resistencia a la segregación.

c) Anillo “J” (o Anillo japonés).

Consiste en llenar el Cono de Abrams con la muestra del hormigón y levantarlo de modo vertical y a velocidad constante dentro de un anillo metálico con varillas metálicas de igual diámetro y dispuestas a intervalos regulares. Se debe de medir el tiempo que demora la mezcla en luego de atravesar las varillas de anillo alcanzar un diámetro de 50cm.

Mide la capacidad de paso entre armaduras.

3.2 Ensayos al hormigón autocompactante en estado endurecido.

El ensayo que por excelencia se le realiza al hormigón en estado endurecido es el de rotura de probetas a la compresión.

Se prefiere la realización de probetas “chicas” ya que permite, al tener éstas menor volumen, el

llenado de más moldes. Generalmente se llenan 5 probetas, las que se rompen 2 a los 7 días y 3 a los 28 días.

El procedimiento que se sigue para el curado de las probetas de un hormigón autocompactante es igual al utilizado para las de hormigón convencional y el ensayo en general (en instrumental y procedimiento) también se repite.

4. Consideraciones finales.

La realización de ensayos y controles de calidad de diverso tipo son una constante en una empresa que pretende estar a la vanguardia en el suministro de hormigones comunes y especiales. Dada las particularidades de estos últimos los controles se intensifican y abarcan la totalidad del proceso.

El estricto seguimiento de las normas y la correcta instrucción del personal encargado en la recolección de muestras y la realización de los ensayos ya sea en laboratorio o a pie de obra es otro aspecto importante para la fiabilidad de los resultados obtenidos.

5. Agradecimientos.

Se agradece la colaboración dada a la autora por el Jefe de Operaciones de “Hormigones Artigas”, Arq. Darío Míguez Passada, durante la visita

al laboratorio de la planta de elaboración de “Hormigones Artigas”.

Tres casos construidos en hormigón convencional y planteo de alternativas con Hormigón de Alto Desempeño

Inés Correa Rosales¹

1. e-mail: arqicorrea@gmail.com

Resumen: Se analizarán tres casos de obras construidas utilizando hormigones convencionales en la ciudad de Tacuarembó, y se plantearán soluciones alternativas con hormigones de alto desempeño.

Las obras seleccionadas tienen la particularidad de ser obras públicas, con diferentes solicitaciones y escalas, emplazadas tanto en la ciudad como en zona rural de Tacuarembó. Se seleccionaron con el fin de ilustrar el alcance del material, sus ventajas y usos más allá de la escala de las obras.

Palabras clave: desempeño, mantenimiento, durabilidad.

Se tomarán tres casos: Un gimnasio Polideportivo: caso de estudio 1. Puentes de Paso del Bote: caso de estudio 2. Cuatro puentes rurales: Caso estudio 3.

Abstract: Three buildings made of conventional concrete in the city of Tacuarembó will be studied and alternative solutions using high performance concrete will be suggested.

The selected buildings are all state-owned buildings, with different uses, requirements and sizes; and, with diverse locations, going from the city to the rural zone. The buildings were chosen to analyze the performance of the material, its advantages and applications, beyond the scale of each building.

Key words: performance, maintenance, durability

The study will focus in:

Case 1: a sports center.

Case 2: two bridges located in the city.

Case 3: four small bridges located in the rural zone.

1. Introducción

Caso de estudio 1: Polideportivo

Ubicado en la ciudad, con estructura de pórticos prefabricados de hormigón armado, muros de bloque y techo liviano de 14m de altura máxima. El proyecto tiene un área de 2500m².

Destino principal: cancha polideportiva reglamentaria para la práctica de voleibol y básquetbol y una piscina climatizada semiolímpica.

El sector de servicios incluye un hall de acceso de deportistas, con vestuarios, SSHH, consultorio médico y oficinas para gestión administrativa; el sector de acceso al público comprende una cantina, así como SSHH públicos y accesibles.



Figura 1: vista general Polideportivo. Fuente: <https://www.presidencia.gub.uy/sala-de-medios/fotografias/polideportivo-de-tacuarembó-cuenta-con-gimnasio-y-piscina-climatizada>

Caso de estudio 2: Puentes de Paso del Bote

Construcción de dos puentes y las vías de tránsito asociadas en la ciudad de Tacuarembó, sobre el arroyo Tacuarembó Chico y una cañada afluente de éste. Uno de los puentes está constituido por dos arcos y otro por un arco solo.

El diseño de los nuevos puentes es de tipo arco atirantado materializado en hormigón armado y hormigón pos-tensado, siendo la conexión entre los arcos y el tablero en base a un sistema de péndolas de acero de alta resistencia.

Figura 2: vista general Puente Paso del Bote.



Caso de estudio 3: Puentes Rurales

El proyecto contempla la reconstrucción de 4 puentes existentes. Se ampliarán estribos y apoyos intermedios en los puentes existentes de modo de aprovechar su infraestructura que se encuentre en buen estado. La superestructura se ejecutará se ejecutará tanto de losetas como perfilaría metálica con posterior hormigonado in situ.

En todos los puentes a intervenir se ejecutarán sus losas de acceso, colocación de barandas, adecuación vial del tramo y señalización correspondiente.

Figura 3: vista general Puente Rural. Fuente: <https://qubeingenieria.com/seccion/es/proyectos/7/puentes-paso-bote/26>



Figura 4: Polideportivo, armado y llenado in-situ de pórtico.



Figura 5: Polideportivo, posicionado.

2. Datos de obra

Se detallan resultados de ensayos de probetas de los tres casos para ilustrar los valores de hormigón convencional utilizados en cada caso y se adjuntan dimensiones de las piezas ensayadas.

Polideportivo

Se tomaron como referencia los ensayos realizados en cinco pórticos que componen la estructura: T5,

T6, T7 y T8. Se adjunta planilla con valores en el Anexo al final del presente trabajo.

Las roturas se realizaron a los 7 y 28 días correspondientemente. El valor mínimo a los 7 días fue de 172,2 kg/cm²; el valor máximo obtenido fue de 310,9 kg/cm². Mientras que a los 28 días estos valores pasaron a: 316,6 kg/cm². Las resistencias obtenidas cumplieron con los requerimientos especificados en las memorias de cálculo de los elementos.

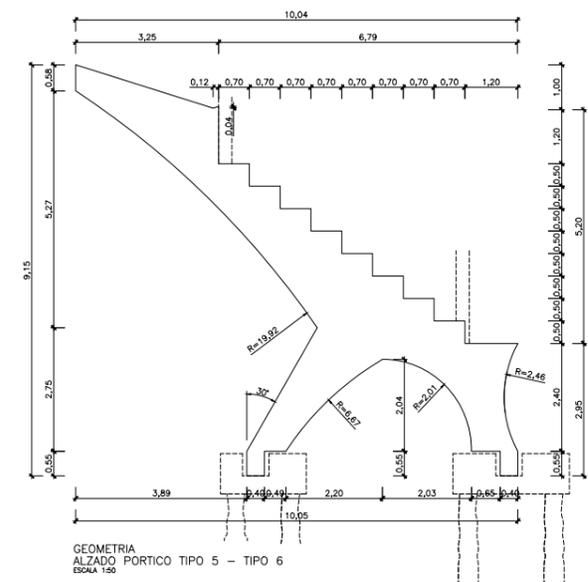


Figura 6: Polideportivo, dimensiones.



Figura 7: llenado del arco



Figura 8: llenado del arco

Puentes de Paso del bote

Los resultados de los ensayos dieron una resistencia promedio de 515kg/cm² en el arco DP1V2 para 10 probetas. Se requería una resistencia según pliego de 450 kg/cm².

Puentes Rurales

Se toman como referencia los valores obtenidos de las probetas extraídas del llenado de la losa de acceso Est2 del puente rural P08. Los valores de rotura obtenidos fueron de 362 kg/cm² y 373 kg/cm² a los 12 días y de 362 kg/cm² y 357 kg/cm² a los 24 días.

Figura 9: armaduras del puente de Paso del bote.



3. Alternativas para cada caso y fundamentaciones.

Caso 1: Polideportivo.

Dado el carácter de prefabricado de los pórticos, el medio en que se colocaron, los medios disponibles para su posicionado y armadura densa y encofrado complejo, la alternativa propuesta es de hormigón autocompactante que hubiera permitido un llenado simple, con menos operarios, que aseguraba mejor y más eficiente llenado del molde, con mejor desempeño dado su menor porosidad, y que posiblemente hubiera dado una resistencia mayor.

Figura 10: Proceso de obra de puentes rurales.



Laboratorio		Obra:										N° Planilla: 1		
		Polideportivo - Tacuarembó										Fecha: del 4/07/2014 al 8/08/2014		
Probeta N°	Fecha de Llenado	Asentamiento (cm)	Fecha de Ensayo	Diámetro (cm)	Al-tura (cm)	Carga de Rotura (Kg)	Carga de Rotura Corregida (Kg)	Tensión de Rotura (kg/cm ²)	Relación de Resis-tencias	Días	Resis-tencia Especifi-cada	Procedencia	Observaciones	
1	4/7 1	7/4/2014	6,5	7/11/2014	15	30	39.900	40590,3	229,7	1,41	7	163	pórtico T6-1	a los 7 días 65% de 250
2	4/7 1	7/4/2014	6,5	8/1/2014	15	30	55.000	55951,5	316,6	1,27	28	250		no rompió
3	4/7 1	7/4/2014	6,5		15	30								
4	4/7 2	7/4/2014	3,0	7/11/2014	15	30	46.100	46897,5	265,4	1,63	7	163	pórtico T6-1	a los 7 días 65% de 250
5	4/7 2	7/4/2014	3,0	8/1/2014	15	30	57.000	57986,1	328,1	1,31	28	250		no rompió
6	4/7 2	7/4/2014	3,0		15	30								
7	11/7 3	7/11/2014	5,5	7/21/2014	15	30	54.000	54934,2	310,9	1,91	10	163	pórtico T6-2	a los 7 días 65% de 250
8	11/7 3	7/11/2014	5,5	8/8/2014	15	30	55.000	55951,5	316,6	1,27	28	250		no rompió
9	11/7 3	7/11/2014	5,5		15	30								
10	11/7 4	7/11/2014	6,0	7/21/2014	15	30	51.000	51882,3	293,6	1,80	10	163	pórtico T6-2	a los 7 días 65% de 250
11	11/7 4	7/11/2014	6,0	8/8/2014	15	30	55.000	55951,5	316,6	1,27	28	250		no rompió
12	11/7 4	7/11/2014	6,0		15	30								
13	21/7 5	7/21/2014	4,5	7/28/2014	15	30	45.000	45778,5	259,1	1,59	7	163	pórtico T8	a los 7 días 65% de 250
14	21/7 5	7/21/2014	4,5	8/18/2014	15	30	55.000	55951,5	316,6	1,27	28	250		no rompió
15	21/7 5	7/21/2014	4,5		15	30								
16	23/7 6	7/23/2014	3,0	7/30/2014	15	30	51.000	51882,3	293,6	1,80	7	163	pórtico T5	a los 7 días 65% de 250
17	23/7 6	7/23/2014	3,0	8/20/2014	15	30	55.000	55951,5	316,6	1,27	28	250		no rompió
18	23/7 6	7/23/2014	3,0		15	30								
19	26/7 7	7/26/2014	9,0	8/4/2014	15	30	42.000	42726,6	241,8	1,48	9	163	pórtico T7-1	a los 7 días 65% de 250
20	26/7 7	7/26/2014	9,0	8/23/2014	15	30	55.000	55951,5	316,6	1,27	28	250		no rompió
21														
22	1/8 8	8/1/2014	3,0	8/8/2014	15	30	30.000	30519,0	172,7	1,06	7	163	pórtico T7-2	a los 7 días 65% de 250
23	1/8 8	8/1/2014	3,0	8/29/2014	15	30	55.000	55951,5	316,6	1,27	28	250		no rompió
24	1/8 8	8/1/2014	3,0		15	30								

Tablas: Resultados de ensayos de probetas.

A - Polideportivo

B - Puentes Paso del Bote

Laboratorio		Obra:							Elemento o zona hormigonada:		
		758- Puentes sobre Paso del Bote (IDT)									
Probeta N°	Fecha de Llenado	Asentamiento (cm)	Fecha de Ensayo	Diámetro (cm)	Al-tura (cm)	Carga de Rotura (KN)	Carga de Rotura Corregida (Kg)	Días	Resistencia Especifi-cada	Proce-dencia	Observaciones
1826	5/17/2016	8,5	6/14/2016	15	30	886	508,0	28	450		Arco D P1 y P2
1827	5/17/2016	8,5	6/14/2016	15	30	876	503,0	28	450		Arco D P1 y P2
1832	5/17/2016	8,0	6/14/2016	15	30	1000	574,0	28	450		Arco D P1 y P2
1833	5/17/2016	8,0	6/14/2016	15	30	934	536,0	28	450		Arco D P1 y P2
1838	5/17/2016	9,5	6/14/2016	15	30	867	498,0	28	450		Arco D P1 y P2
1839	5/17/2016	9,5	6/14/2016	15	30	893	512,0	28	450		Arco D P1 y P2
1844	5/17/2016	8,5	6/14/2016	15	30	902	518,0	28	450		Arco D P1 y P2
1845	5/17/2016	8,5	6/14/2016	15	30	873	501,0	28	450		Arco D P1 y P2
1850	5/17/2016	9,5	6/14/2016	15	30	874	502,0	28	450		Arco D P1 y P2
1851	5/17/2016	9,5	6/14/2016	15	30	884	507,0	28	450		Arco D P1 y P2

Puente	Elemento	Probeta N°	Fecha de Llenado	Fecha de Ensayo	Edad días	Carga de Rotura Kg	Carga de Rotura Kg/cm2
P08	Losas de acceso Est 2	1	26-oct	07-nov	12	66.000	373,0
		4	26-oct	07-nov	12	66.000	362,0
P08	Losas de acceso Est 2	2	26-oct	19-nov	24	64.000	362,0
		6	26-oct	19-nov	24	63.000	357,0
		8	26-oct	19-nov	24	62.000	351,0

C - Puentes Rurales

Otra ventaja de haber realizado un hormigón autocompactante hubiera sido un mejor acabado superficial, los pórticos del diseño quedan vistos y su acabado constituye un punto importante.

En cuanto a materiales y a tipo de aditivo y/o adiciones a utilizar, para esta opción se debe tener los cuidados correspondientes con respecto a los áridos a utilizar en la mezcla: por ejemplo, el tamaño máximo del árido grueso. Como en Tacuarembó no hay disponibles fillers o adiciones, la recomendación sería que se tendría que utilizar algún aditivo para la mezcla y así mejorar aspectos como el acabado final, la fluidez y la trabajabilidad de la mezcla, darle el carácter de autocompactante a la misma. Una de las opciones disponibles en el mercado sería superplastificantes del tipo de Sika Viscocrete 5100 CL que es un reductor de agua de alta eficiencia.

Otro punto importante es el de considerar la velocidad de desencofrado, la obra se realizó con un solo molde dado su complejidad y utilizar un hormigón fácil y rápido de desencofrar contribuiría a lograr menores tiempos de ejecución total.

Caso 2: Puentes de Paso del Bote.

En el caso de los Puentes de Paso del Bote, la propuesta inicial indicaba Humo de Sílice en la mezcla del hormigón, pero este tipo de adiciones no se encuentra disponible en el mercado local. Finalmente se optó por realizar un hormigón convencional.

Los puentes de este caso se pueden dividir en tres partes formales: el tablero inferior tipo bowstring, los arcos que los componen y las pilas de apoyo intermedio. Las piezas más particulares y que ameritan un diseño de HAD a nuestro entender son los arcos. Dado la forma de los arcos y el proceso de encofrado hubiera sido muy útil un hormigón no solo autocompactante sino con alta resistencia (a la cual finalmente se llegó en obra). Esto hubiera permitido disminuir la armadura utilizada en los arcos y facilitado el llenado y la concreción de la formalidad de los mismos. La necesidad de autocompactación también viene de la mano con la formalidad de los elementos y los beneficios de menor mano de obra y menor tiempo de llenado.

Aparte de la dosificación y aditivos y adiciones a utilizar, en este caso, uno de los ítems importantes a considerar al diseñar este hormigón, es, que la obra se realizó principalmente en verano por lo cual el tipo y tiempo de curado deben de pensados previo al comienzo de la obra. Se recomienda entonces la utilización de productos filmógenos de curado, líquidos, tipo pintura, integrados por una base y un disolvente volátil.

Caso 3: Puentes Rurales

La mayor complejidad encontrada en este caso, es la distancia a la ciudad de la ubicación de los puentes en el territorio. Se deben tomar recaudos específicos en cuanto al transporte del hormigón a utilizar. Al contrario que el caso

anterior el llenado se realizó principalmente en invierno por lo que se comenzaba la producción en planta muy temprano y con temperaturas muy bajas, lo que lleva a la recomendación de la necesidad de prever los tiempos de traslado al lugar en estas condiciones.

Hubiera sido importante haber llegado a una alta resistencia que redujera los tiempos de necesidad de mantenimiento o reemplazo de partes, además de que todos ellos se encuentran en zonas inundables y con corrientes fuertes cuando esto sucede lo que lleva a necesitar un hormigón más durable y menos poroso que el convencional.

4. Consideraciones Finales

Los tres casos tienen sus particularidades y complejidades que pueden ser solucionadas con HAD, utilizando tecnologías y materiales disponibles en el mercado local. Es muy importante entender el medio en que se implanta cada obra y los procedimientos que van a ser utilizados en cada caso y así planificar previamente la logística

de cada llenado. Aparte, el departamento de Tacuarembó presenta un clima diferente al de la capital con su cercanía al mar. Esto hace que se deba tener en cuenta la diferencia en cuanto al clima local sobre todo en verano y para los procedimientos de curado del hormigón diseñado.

Se aclara que, si bien no se hizo un estudio económico de las diferentes alternativas planteadas para cada caso, se piensa que lo planteado no presentaría beneficios de costo inicial, pero si en cuanto a durabilidad de las obras y un ahorro en cuanto a necesidad de mantenimiento a corto plazo o inclusive en tiempos de reemplazo de algún componente.

Agradecimientos

- Arq. Andrea Fernández. Directora de Obra de Polideportivo.
- Arq. Federico Díaz. Director de obra Puentes Paso del Bote.
- Arq. Sebastián Serradell. Director de Obra Puentes Rurales.

Referencias

- [1] P-C. AÏTCIN, T. CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO: Ciencia y tecnología: Universidad de Sherbrooke, Quebec, Canadá.
- [2] Iizuka, M., and Tanaka, H. 1986. Cement admixture. US Patent 4,586,960, May 6, 1986. (Formato de Patente)
- [3] http://www.wury.sika.com/content/uruguay/main/es/solutio_ns_products/descargas/hojas-tecnicas.html

[4] Intendencia Tacuarembó. 2014. Memoria Constructiva Particular Polideportivo

[5] Intendencia Tacuarembó. 2016. Memoria Constructiva Puentes Paso del Bote

[6] GS Ingenieros Estructurales. Proyecto: Puentes paso del Bote. Especificaciones técnicas particulares. Ing. Mario Gutiérrez.

[7] Intendencia Tacuarembó. 2016. Memoria Constructiva Puentes Rurales

Hormigón en masa, refuerzo con fibras sintéticas como alternativa a elementos de acero

Carla Carena Gordillo¹

1. e-mail: carena.grupoc@gmail.com

Resumen: Dado que las patologías más frecuentes en los elementos estructurales de hormigón se manifiestan a partir de los procesos de corrosión vinculados a las armaduras y mallas de refuerzo de acero, y considerando la fuerte presencia de ambientes marítimos en nuestro país; resulta oportuno el abordaje del tema de hormigón en masa como alternativa a los elementos de hormigón armado.

Para ello, se estudiarán las características principales del hormigón en masa de acuerdo a lo establecido en EHE 08 - Instrucción de Hormigón Estructural. Se considerará la posibilidad de incorporación de macrofibras sintéticas en la masa de hormigón con el fin de aumentar la tenacidad del mismo, absorber esfuerzos provocados por las variaciones de temperatura y retracción del material; pudiendo así proceder a la eliminación de mallas de refuerzo de acero en superficies como pisos y pavimentos. Por último, se presentará un ejemplo de aplicación en pavimentación vial con Hormigón Reforzado con Fibras (HRF).

Palabras clave: Hormigón en masa, macrofibras sintéticas, pavimentación.

Abstract: In as much as the most frequent pathologies in concrete structural elements are manifested from the corrosion processes linked to reinforcement steel bars and reinforcement steel meshes, and considering the strong presence of maritime environments in our country; it is appropriate to approach the topic of mass concrete as an alternative to reinforced steel concrete elements.

To do this, the main characteristics of the mass concrete will be studied according to the provisions given in EHE 08 – Structural Concrete Instruction. It will be considered the possibility of incorporating synthetic macrofibres in the concrete mass in order to increase its tenacity, to absorb stress caused by temperature variations and material retraction; thus being able to proceed to the elimination of steel reinforcement meshes on surfaces such as floors and pavements. Finally, an example of application of road paving with Concrete Fibre Reinforced (CFR) will be presented..

Key words: Mass concrete, synthetic macrofibres, paving.

1. Introducción

El hormigón es el material más utilizado en la industria de la construcción para dar respuesta estructural a la mayoría de los programas

arquitectónicos. Se emplea sometido a un rango muy amplio de solicitaciones de carga y desempeño, así como en diferentes medios que implican su

correcto funcionamiento trabajando enterrados, expuestos sin terminaciones superficiales, en medios altamente salinos, etc.

Es posible que aparezcan patologías en el hormigón por diversas causas, considerando que es un material poroso, y por lo tanto permeable y penetrable. En la mayoría de los casos, las mismas se manifiestan con la presencia de rugosidades, ampollas, cambios de coloración como por ejemplo manchas de color ferroso, grietas, fisuras, desprendimientos y en casos más extremos; la existencia de exfoliación. Estos síntomas se presentan sobre el material de terminación o en el hormigón mismo cuando la estructura es de hormigón visto. Todos estos cambios se producen por reacción química entre agentes externos agresivos y el hormigón; esta reacción química puede deberse a la carbonatación, oxidación de la armadura por falta de recubrimiento, porosidad en el hormigón y en ambientes marinos la salinidad [1]. Las consecuencias finales acaban siendo la corrosión de armaduras, degradación del hormigón y posterior disminución de resistencia de la pieza; lo que puede incluso llevar al colapso de la misma.

Considerando la amplia área costera de nuestro país, sobre la cual además, en los departamentos de Montevideo y Maldonado, se emplazan mayormente edificios en altura; y las crecientes actividades en el sector portuario, donde en

los últimos años las instalaciones de nuestro principal puerto se han duplicado en aérea; resulta interesante el estudio de componentes estructurales o de desarrollo horizontal (explanadas y vías de circulación) de hormigón sin estructura o elementos auxiliares de acero.

Se procederá, a continuación, al estudio de las características del hormigón en masa; y se analizará a través de un ejemplo concreto las posibilidades que la incorporación de fibras sintéticas (macrofibras) ofrece para la eliminación de elementos de acero dentro de la masa de hormigón.

2. Características del material [2]

De acuerdo con la EHE 08 - Instrucción de Hormigón Estructural, se consideran elementos estructurales de hormigón en masa los construidos con hormigón sin armaduras y los que tienen armaduras sólo para reducir los efectos de la fisuración, generalmente en forma de mallas junto a los paramentos.

Una forma de garantizar la durabilidad del hormigón, consiste en obtener un hormigón con una permeabilidad reducida. Para obtenerla son decisivas la elección de una relación agua/cemento suficientemente baja, la compactación idónea del hormigón, un contenido adecuado de cemento y la hidratación suficiente de éste, conseguida por un cuidadoso curado. La resistencia mecánica de un

Figura 1 - Especificación para resultados de ensayo de penetración de agua

Clase de exposición ambiental	Especificación para la profundidad máxima	Especificación para la profundidad media
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados)	50 mm	30 mm
IIIc, Qc, Qb (solo en el caso de elementos pretensados)	30 mm	20 mm

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Máxima relación a/c	masa	0.65	-	-	-	-	-	-	0.50	0.50	0.45	0.55	0.50	0.50
	armado	0.65	0.60	0.55	0.50	0.50	0.45	0.50	0.50	0.50	0.45	0.55	0.50	0.50
	pretensado	0.60	0.60	0.55	0.45	0.45	0.45	0.45	0.50	0.45	0.45	0.55	0.50	0.50
Mínimo contenido de cemento	masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275
	armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

Tabla 2 – Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento.

hormigón no debe emplearse como determinante de la idoneidad frente a la durabilidad.

2.1 Permeabilidad

La forma más adecuada de reducir los ataques al hormigón es conseguir que sus poros ocupen el menor volumen posible y formen una red capilar poco intercomunicada. Este es el objetivo que se pretende conseguir mediante los requisitos de contenido de agua y de cemento. Al no haber métodos normalizados para el control de estos contenidos, se necesita recurrir a otras

comprobaciones de carácter indirecto a través de ensayos de comportamiento como el de penetración de agua.

La impermeabilidad al agua del hormigón es una condición necesaria, aunque no suficiente, para lograr un comportamiento adecuado frente a los ataques agresivos.

Un hormigón se considera suficientemente impermeable al agua si los resultados del ensayo de penetración de agua cumplen simultáneamente las especificaciones de la tabla 1.

Tabla 2 – Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento.

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Resistencia Mínima (N/mm ²)	masa	20	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
	armado	25	25	30	30	30	0.45	30	30	30	35	30	30	30
	pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

Consistencia	Tipo de compactación
Seca	Vibrado enérgico
Plástica	Vibrado normal
Blanda	Vibrado normal o picado con barra
Fluida	Picado con barra

Tabla 4 – Tipo de compactación en función de la consistencia del hormigón.

El tipo de ambiente al que está sometido un elemento estructural viene definido por el conjunto de condiciones físicas y químicas a las que está expuesto, y que puede llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a los de las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural.

Generalmente, los elementos estructurales de hormigón en masa tienen siempre una clase general de exposición I (no agresiva), dado que la inexistencia de armaduras impide cualquier posibilidad de corrosión.

2.2 Limitaciones a los contenidos de agua y de cemento:

En el caso particular que se utilicen adiciones en la fabricación del hormigón, se podrá tener en cuenta su empleo a los efectos del cálculo del contenido de cemento y la relación agua/cemento.

2.3 Compactación

La compactación de los hormigones en obra se realizará mediante procedimientos adecuados a la consistencia de las mezclas y de manera tal que se eliminen los huecos y se obtenga un perfecto cerrado de la masa, sin que llegue a producirse segregación. El proceso de compactación deberá prolongarse hasta que refluya la pasta a la superficie y deje de salir aire.

Una inadecuada compactación del hormigón en obra puede conducir a defectos (por ejemplo, excesiva permeabilidad en el caso de compactación

insuficiente, o formación de una capa superficial débil en el caso de una compactación excesiva) que no se reflejen suficientemente en el valor de la resistencia a compresión, pero que pueden alterar significativamente otras propiedades, como la permeabilidad.

2.4 Curado

De las distintas operaciones necesarias para la ejecución de un elemento de hormigón, el proceso de curado es una de las más importantes por su influencia decisiva en la resistencia y demás cualidades del hormigón resultante. Durante el fraguado y primer período de endurecimiento del hormigón, deberá asegurarse el mantenimiento de la humedad del mismo mediante un adecuado curado. Éste se prolongará durante el plazo necesario en función del tipo y clase del cemento, de la temperatura y grado de humedad del ambiente, etc. El curado podrá realizarse manteniendo húmedas las superficies de los elementos de hormigón, mediante riego directo que no produzca deslavado. El curado por aportación de humedad podrá sustituirse por la protección de las superficies mediante recubrimientos plásticos, agentes filmógenos u otros tratamientos adecuados, siempre que tales métodos, especialmente en el caso de masas secas, ofrezcan las garantías que se estimen necesarias para lograr, durante el primer período de endurecimiento, la retención de la humedad inicial de la masa, y no contengan sustancias nocivas para el hormigón.

Los principales métodos para el curado del hormigón son los siguientes:

- Protección con láminas de plástico.
- Protección con materiales humedecidos (sacos de arpillera, arena, paja, etc.).
- Riego con agua.
- Aplicación de productos de curado que formen membranas de protección.

Estos métodos pueden usarse separadamente o en combinación. No todos los métodos de curado son igualmente eficaces. En general, los métodos en los que se añade agua producen una estructura de poros más densa que los métodos que sólo impiden la desecación del hormigón.

Se recomienda empezar el curado a partir de las 2-3 horas de que el hormigón haya fraguado, mediante aportación de agua. El tiempo en que debe prolongarse el curado no está absolutamente definido, pero es recomendable curar con aporte de agua durante 7 días y a partir de ese momento, si fuese necesario, utilizar algún producto químico de curado para crear una capa de sellado en la superficie.

3. Macrofibras [3]

Estas fibras están destinadas a prevenir la fisuración en estado endurecido, a reducir el ancho de la fisura si ésta se presenta y a permitir el adecuado funcionamiento de la estructura fisurada. Las dosificaciones más frecuentes oscilan entre 0.2% a 0.8% del volumen del hormigón. Las macrofibras más usadas son las sintéticas y las metálicas cuyos diámetros varían entre 0.05 mm a 2.00 mm. La relación de aspecto (L/d) de las macrofibras varía entre 20 a 100.

Las macrofibras pueden ser metálicas, sintéticas o naturales.

Las dosificaciones en términos de peso varían así de acuerdo con la densidad del material, las fibras de acero requieren entre 20 a 50 kg/m³ de hormigón y las fibras sintéticas (polipropileno) entre 2 a 9 kg/m³.

Las macrofibras actúan en estado endurecido, es decir antes de las 24 horas no tienen mayor efecto.

Las macrofibras se incluyen y mezclan en el hormigón como si fuesen un agregado más, normalmente exigen un tiempo de mezclado adicional de entre 3 a 5 minutos para garantizar su completa dispersión.

El principal objetivo de incluir macrofibras dentro de la masa de hormigón es aumentar la tenacidad del material, es decir para hacer que las estructuras, incluso después del agrietamiento de la matriz, puedan seguir siendo cargadas. La tenacidad es una propiedad que describe de una manera más completa la capacidad de un material para soportar cargas antes de colapsar.

Las macrofibras en pisos y pavimentos reemplazan la malla electrosoldada que es colocada en el centro del espesor (otros autores prefieren localizarla en el centro del tercio superior), destinada a absorber los esfuerzos de temperatura y retracción en dichos elementos.

Las mallas electrosoldadas se han usado para resolver los esfuerzos secundarios en pisos y pavimentos. Sin embargo su almacenamiento, transporte y colocación (correcta!) ha sido una fuente de dificultades en las obras, por no mencionar la inversión en mano de obra y tiempo. Justamente para resolver estos inconvenientes las macrofibras logran reemplazar el efecto de la malla. Las macrofibras en pisos y pavimentos previenen la aparición de fisuras a larga edad (en estado endurecido), si la fisuración tiene lugar impiden el incremento en el ancho de la misma, pero más importante aún permiten que la estructura continúe en servicio al aumentar su tenacidad. Este hecho multiplica la vida útil de la estructura.

4. Ejemplo concreto de aplicación

Desarrollo e implementación de un Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) sintéticas para la repavimentación de la Ruta 24 de Uruguay [4].

En 2010 en la República Oriental del Uruguay surge la necesidad de rehabilitar la Ruta 24, una vía sometida a un incremento significativo de tránsito pesado.

La calzada existente era de asfalto y se plantea el desafío de competir, técnica y económicamente con la alternativa flexible, mediante la construcción de un Whitetopping adherido de hormigón reforzado con macro fibras sintéticas, de habilitación temprana, aplicado mediante tecnología de alto rendimiento (TAR).

4.1 Aspectos generales de la obra

Un factor determinante, fue sin duda, la decisión de los profesionales del Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Uruguay, de avanzar en la aplicación de una metodología innovadora, dando lugar a la primera experiencia en la región. Considerando la vida útil requerida (15 años) y el tránsito previsto (15 millones de ejes equivalente AASHTO), con el asesoramiento de Jeffrey Roesler, se adoptó un novedoso método de diseño estructural desarrollado en Illinois, USA, el cual considera la resistencia residual que le confieren las macrofibras al hormigón, entre otros parámetros de diseño, lo que resultó en una capa de 15 cm de espesor, con losas cortas de 1,8m x 1,8m.

El hormigón debía poseer a 28 días un Módulo de rotura de 5 MPa y resistencia residual para una

flecha de 3 mm igual al 20% de la anterior (1 MPa). Para la habilitación al tránsito se indicó un Módulo de rotura igual o mayor a 3,8 MPa (550 psi).

El desarrollo de un hormigón con macro fibras (al que se le sumaron micro fibras) y de rápida habilitación representaba un desafío, que conlleva la búsqueda de la fibra más conveniente, el uso de contenidos acotados de cemento (ya que en pavimentos debe minimizarse el salto térmico) y la generación de una rápida resistencia. Estos últimos requerimientos junto con el mantenimiento de la consistencia del hormigón llevaron al uso de aditivos poliméricos (policarboxilatos).

4.2 Selección y fibras y dosificación de Hormigón empleado

Mediante estudios preliminares se seleccionó el tipo y contenido de fibra a emplear en la obra. Conforme los requisitos era necesario incorporar una macrofibra sintética capaz de aportar las propiedades residuales buscadas y también se pedía el uso de una microfibras sintética. Se exploraron alternativas con diferentes macrofibras sintéticas disponibles en el mercado (Tabla 5) identificadas como A, B, C, D, E, F, G, H, I, que fueron incorporadas

Tabla 5 – Fibras consideradas en los estudios preliminares.

Fibra	Nombre	Procedencia	Material	Descripción
A	Ruredil	Italia	Poliolf + Poliprop	tipo trenza, caras, 54 mm, 0,48mm
B	BarChip60	Australia	Olefina modificada	monofilamento rígida 60 mm, E: 10 Gpa
C	BarChip54	Australia	Olefina modificada	monofilamento rígida 54 mm, E: 10 Gpa
D	Enduro	EEUU	Polipropileno	monofilamento flexible, 51 mm.
E	TB-PP-fiber	China	Polipropileno	monofilamento flexible, 50 mm, E > 3,5 GPa
F	TB Twisted	China	Polipropileno	trenza, tipo racimo 50 mm, E > 3,5 GPa
G	LTD	China	Polipropileno	monofilamento flexible 54 mm
H	LTD Twisted	China	Polipropileno	trenza, tipo racimo 54 mm
I	BarChip MQ58	Japón	Olefina modificada	4 juntas finas, 58 mm, E: 6,8 Gpa
mf	FibroMac12	Brasil	Polipropileno	microfibra 12 mm, 18 m, E: 3 Gpa

Fibras, dosis incorporada	MR (MPa)	f 0 150 (%)	f'c (MPa)	MR/f'c (%)
A, 1,5 Kg	4,4	6,1	42,1	10,5
A, 2,0 Kg	4,2	11,9	39,1	10,8
A, 2,5 Kg	4,9	18,6	38,1	12,9
B, 2,0 Kg	4,9	20,2	38,6	12,7
B, 2,5 Kg	4,8	20,1	40,5	12,0
B, 3,0 Kg + 0,6 mf	5,2	22,9	34,8	15,0
B, 3,0 Kg + 0,6 mf	4,6	19,2	41,8	11,0
B, 3,0 Kg + 0,6 mf	5,2	31,5	40,1	13,0
C, 2,0 Kg + 0,6 mf	4,8	20,9	43,4	11,1
C, 2,5 Kg + 0,6 mf	4,6	31,0	35,6	12,9
C, 2,8 Kg + 0,6 mf	4,5	35,7	38,6	11,7
D, 2,0 Kg + 0,6 mf	5,0	12,8	39,9	12,5
D, 2,5 Kg + 0,6 mf	4,8	13,2	43,4	11,0
D, 3,0 Kg + 0,6 mf	4,6	25,8	42,0	10,9
E, 2,0 Kg + 0,6 mf	4,7	11,6	34,9	13,5
E, 2,5 Kg + 0,6 mf	4,9	12,1	34,7	14,1
E, 3,0 Kg + 0,6 mf	5,9	7,9	42,7	13,8
F, 2,0 Kg + 0,6 mf	4,2	15,4	36,5	11,6
F, 2,5 Kg + 0,6 mf	4,2	20,3	39,9	10,5
F, 2,8 Kg + 0,6 mf	4,4	24,3	31,9	13,8
F, 3,0 Kg + 0,6 mf	5,0	17,1	42,8	11,7
G, 2,0 Kg + 0,6 mf	3,8	6,3	39,6	9,7
G, 2,5 Kg + 0,6 mf	3,9	6,7	25,8	10,9
G, 3,0 Kg + 0,6 mf	4,6	11,4	33,5	13,8
H, 2,0 Kg + 0,6 mf	3,7	8,4	40,6	9,0
H, 2,5 Kg + 0,6 mf	4,1	10,8	42,0	9,7
H, 3,0 Kg + 0,6 mf	3,7	15,1	36,4	10,1
I, 2,0 Kg + 0,6 mf	4,8	14,5	40,0	12,0
I, 2,5 Kg + 0,6 mf	5,0	21,3	40,8	12,3
I, 2,8 Kg + 0,6 mf	4,7	25,5	39,9	11,8

Tabla 6 – Estudios preliminares para la selección del tipo y contenido de fibras.

en contenidos variables, adicionando microfibras (mf) en la mayoría de los casos.

Se realizaron hormigones con contenidos de cemento entre 340 y 380 kg/m3. La Tabla 6 presenta

algunos resultados de los estudios preliminares, se informan los valores de resistencia a flexión (MR), la capacidad residual para una flecha de 3 mm (fD 150) expresada en porcentaje de MR y las correspondientes resistencias a compresión

y relación flexión/compresión. Considerando los requisitos de diseño del pavimento, se buscaba garantizar un valor de fD 150 mayor al 20 % de MR. En base a estos resultados se optó por la macrofibra C - Barchip 54 (Figura 1) como la mejor opción técnica y económica para lograr una resistencia residual superior a 1 MPa. La provisión de un dosificador en la planta fue determinante para obtener una distribución homogénea de la fibra durante el mezclado. Luego se ajustaron los contenidos de cemento y fibras para alcanzar las consignas de resistencia y la dosificación resultante fue: agua 140 kg/m³, cemento 340 kg/m³, arena 800 kg/m³ (MF 2,86; Cantera Viurrarena - Mercedes), piedra 1040 kg/m³ (Tmax 30 mm, MF 7,28; Cantera Boccagni - Palmitas), aditivo 0,6 % en peso de cemento, macrofibras 2,7 kg/m³ y microfibras 0,6 kg/m³.

4.3 Consideraciones constructivas

Además de las prácticas constructivas del buen arte que se deben emplear para la construcción de pavimentos con TAR, se implementaron las recomendaciones de la ACPA para sobrecapas de hormigón. Para garantizar la adherencia, la empresa contratista empleó un procedimiento riguroso para la preparación de la superficie asfáltica existente, que consistió en un fresado controlado, texturizado y limpieza intensiva.

Figura 1 – Macrofibra Barchip 54 [5].



El hormigón se elaboró en una planta con mezcladora central de 2 m³ que produjo en promedio 50 m³/h y permitió una velocidad de avance de 1,5 m/min a la pavimentadora. Un punto clave fue el uso de un dosificador automático para las macrofibras que posibilitó su distribución uniforme en el hormigón y evitó la formación de erizos.

El transporte del hormigón se realizó en camión volcador y la máxima distancia fue de 14 km. La variable clave es el tiempo de transporte, y la pérdida de asentamiento que ocurre frente al clima reinante fue subsanada con el aditivo empleado (policarboxilatos). La principal observación constructiva del método de pavimentación surgió durante la materialización de la faja de prueba, donde al colocar un HRF con asentamiento ≥ 4 cm se verificó una tendencia del sistema de compactación (Wirtgen SP500, vibrado de alta frecuencia) a expulsar las fibras en forma parcial hacia la cámara de vibrado (Figura 3). Por lo que se realizó una segunda faja de prueba con asentamientos más bajos (Figura 4), realizando la extracción de muestras de los 5 cm superiores y los 5 cm inferiores de la calzada hasta verificar la uniformidad en el contenido de fibras. De este modo se estableció el rango adecuado de trabajo, encontrándose el valor ideal para asentamientos entre 2 y 3 cm.

Figura 2 – Macrofibras en hormigón fresco [5].



Figura 3 – Primer faja de prueba [5].

Respecto a la terminación, aunque se observaban algunas macrofibras expuestas parcialmente sobre la superficie del hormigón, esto no afectó el texturado del hormigón. En cuanto al curado se destaca el desempeño del compuesto líquido utilizado, que garantizó la formación de la membrana en tiempo y forma bajo cualquier condición climática y de exudación del hormigón. Tal fue el éxito de este producto, y ante la ausencia de fisuras plásticas, que se planteó un tramo experimental para discernir la utilidad de incorporar microfibras cuya principal función es controlar la fisuración plástica.

Durante el seguimiento de la obra no se registraron jornadas con tiempo frío, por lo que se plantea la inquietud a futuro, sobre el desempeño en invierno del aditivo fabricado con policarboxilatos, dado que se observó en la obra una extensión del tiempo de fraguado en comparación con los valores que se obtuvieron en obras anteriores, donde se empleó aditivos de medio rango.

Otro requisito, producto del sistema de construcción adoptado por media calzada y ante la necesidad de mantener ininterrumpido el tránsito en la obra, fue el de obtener un material tipo Fast-Track (el método de diseño especifica un



Figura 4 – Segunda faja de prueba [5].

módulo de rotura = 3,8 MPa para la habilitación del pavimento). Para ello, en base a la correlación flexión/compresión, se adoptó una resistencia a compresión de 25 MPa para habilitar el pavimento; operativamente en obra se moldearon probetas cilíndricas que se dejaron al pie de obra.

4.4 Control de calidad

El control de calidad de HRF para pavimentos construidos con TAR, comprende por un lado los ensayos típicos para este tipo de construcción, a los que se le suman caracterizaciones singulares, que incluyen parámetros de diseño y experiencias de tipo puntuales.

Entre las propiedades típicas se incluyen la evaluación de la trabajabilidad (Cono de Abrams), la resistencia a compresión (R_c) en probetas de 150 mm de diámetro y el ensayo de testigos de 100 mm de diámetro. La Tabla 7 indica los valores medias, desvíos, máximos y mínimos de c/u de ellas. Los resultados obtenidos se corresponden con lo esperado.

Como propiedades singulares se determinaron el contenido de fibras, el módulo de rotura y la capacidad residual (ASTM C-1609), la

Propiedad	Unidad	Valor medio	Desvío	Valor máximo	Valor mínimo
Asentamiento	cm	3,2	0,5	4,0	2,0
Rc 7 días probetas	Mpa	33,3	3,4	44,7	20,7
Rc 28 días probetas	Mpa	38,3	3,3	44,7	27,3

Tabla 7 – Control de calidad: propiedades típicas.

trabajabilidad mediante un método similar al ensayo VeBe, la exudación y la adherencia HRF-asfalto. Los valores medias, desvíos, máximos y mínimos de cada una de ellas se indican en la Tabla 8.

Para evaluar el contenido de fibras se implementó el siguiente procedimiento: se toman tres muestras de un mismo pastón y se determina el peso inicial de cada una, se colocan en una piletta de lavado y mediante agitación y tamizado se extraen las fibras, se secan y se pesan, y finalmente se calcula la dosis en cada muestra y se promedian. Dado que el hormigón de la obra era un sistema híbrido de macrofibras y microfibras, estas últimas interferían en el procedimiento del conteo de la macro fibras. Por tal motivo, y como la incorporación de las microfibras se realizaba en forma manual, se excluyeron en el pastón de control, permitiendo adicionalmente valorar el efecto y la efectiva necesidad de usar microfibras.

Durante una de las inspecciones a la obra se solicitó al laboratorista extender el tiempo de agitación verificando que se pudo extraer un 10 % más de fibra, con lo que se concluyó que el valor informado, cuenta con un plus de seguridad. El desvío en el contenido de fibra fue muy pequeño, este hecho se atribuye al uso de un dosificador automático de macro fibras, que pudo garantizar un punto clave del proceso.

Los ensayos cumplieron con los requisitos establecidos de Módulo de rotura y fD150, los desvíos se deben a la inestabilidad de los ensayos y

a las variaciones de velocidad de carga, se destaca que el valor mínimo de resistencia residual fue 0,9 MPa y este hecho se produjo solamente en dos oportunidades. En el ensayo de flexión según ASTM C1609 las roturas no siempre se producen en el tercio central, en los ensayos de control se empleó un equipo con rigidez muy acotada para vigas de 150 mm de altura.

Una de las dudas era como afectarían las fibras a la consistencia del hormigón al emplear TAR. Frente a dicho desafío, se empleó un reductor de agua de alto rango; una de sus características es que ante el vibrado produce un efecto tixotrópico que facilita la trabajabilidad. Para evaluar el comportamiento reológico de hormigones de consistencia seca y discernir cual será la diferencia en trabajabilidad de un hormigón de consistencia variable desde 0 hasta 6,5 cm, en base a un concepto similar al ensayo Vebe, se realizó el Cono de Abrams dentro de un recipiente de 25 cm diámetro y 28 cm de altura fijo a la mesa de vibrado, y se registró el tiempo. La Figura 5 representa la correlación entre el tiempo de vibrado y el asentamiento, se observa que hormigones de muy bajo asentamiento continúan siendo bien trabajables, hecho que finalmente fue confirmado por el desempeño en la pavimentadora, que es el verdadero indicador de la trabajabilidad del hormigón.

4.5 Conclusiones

A partir de este proyecto innovador en diversos aspectos, el diseño, el material, el proceso

Propiedad	Unidad	Valor medio	Desvío	Valor máximo	Valor mínimo
Contenido de macro fibras	%	2,63	0,03	2,69	2,60
Módulo de rotura	Mpa	5,60	0,30	6,40	5,10
Resistencia residual	Mpa	1,20	0,20	1,60	0,90
Adherencia HEF-Asfalto	Mpa	1,30	0,20	1,60	1,10
Capacidad de exudación	%	1,40	0,90	2,50	0,30

Tabla 7 – Control de calidad: propiedades típicas.

constructivo y de la experiencia realizada surgen las siguientes conclusiones:

1. Las macro y microfibras se pudieron distribuir homogéneamente durante su mezclado y el éxito del mismo, vinculado a la macro fibra, se debe al uso de un dosificador.
2. Las fibras no afectaron las operaciones de traslado ni la exudación.
3. Los HRF se pudieron distribuir homogéneamente mediante la terminadora para asentamientos entre 2 y 3 cm, por encima de ese valor la terminadora separa las macrofibras, reduciendo la homogeneidad en su distribución.
4. La presencia de macro y micro fibras, no afectaron los procesos de terminación y texturado de la superficie.

5. El uso del policarboxilato fue apropiado, pero merecen destacarse dos aspectos esenciales; uno es que la gente no está acostumbrada a ver el aspecto que presenta el hormigón y la otra es que en clima frío se podría generar un retardo de fraguado.

6. El nivel de adherencia entre HRF y la superficie asfáltica (texturizada) fue aceptable.

7. Se pudo desarrollar un HRF, que incluye aditivos a base de policarboxilato y de consistencia seca, y aplicarlo exitosamente como una sobrecapa de hormigón adherido al pavimento de asfalto texturizado.

8. En la actualidad el pavimento se encuentra habilitado al tránsito en la totalidad del tramo y en perfectas condiciones. Su desempeño es monitoreado (control de cargas) con el

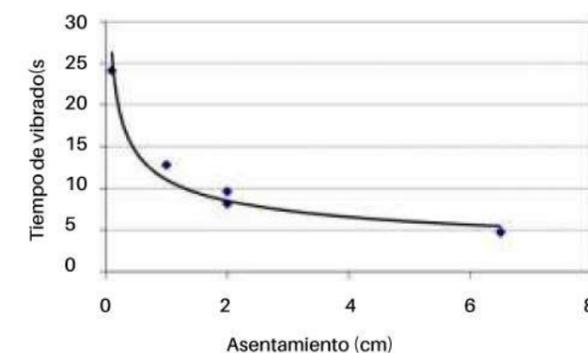


Figura 5 - Variación del tiempo de vibrado para diferentes asentamientos.

objeto de evaluar este novedoso método de diseño y constructivo, incluyendo además la materialización de un tramo experimental de 100 m lineales sin microfibras.

9. El logro de esta construcción fue posible gracias a la conformación de un grupo de trabajo entre las empresas involucradas y los organismos públicos y el soporte de especialistas y organismos científicos.

5. Consideraciones Finales

En la actualidad, el desempeño de los materiales y técnicas utilizadas en el ejemplo de aplicación de hormigón en masa reforzado con macrofibras sintéticas (Ruta Nacional 24, Uruguay), es satisfactorio de acuerdo a lo esperado.

Otros ejemplos satisfactorios que se reportan, pueden ser:

-Rampa para botes en Victor Harbour, Encounter Bay, Australia. 2005.

Dado el ambiente marino, se eliminaron los elementos de estructurales de acero del hormigón, y se utilizó hormigón reforzado con fibras sintéticas.

-Autopista Cerro Sombrero, Chile. Repavimentación de calzada. Pavimento de hormigón en masa reforzado con fibras sintéticas, de 14 cm de espesor.

-Red de transporte público de tranvía eléctrico, Szeged, Hungría. 2008. Utilización de hormigón reforzado con fibras sintéticas, con el fin de aumentar durabilidad y disminuir costos y tiempos

Agradecimientos

Prof. Gerardo Castro, Estabilidad de las Construcciones y Cálculo de Estructuras.

Sr. Guillermo Cracel, Concrete Laboratory, Sika Uruguay S.A.

Dr. Arq. Juan José Fontana, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, UdelaR.

Ing. María Pastorini, Dirección Nacional de Vialidad, Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

Referencias

[1] Loustanau, S. y Poppolo, T. 2013. "Patologías en Estructuras de hormigón Armado" en IX Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, Cinpar.

sintéticas para la repavimentación de la Ruta 24 de Uruguay" en V Congreso Internacional y 19° Reunión Técnica de la AATH "Ing. Oscar R. Batic".

[2] EHE 08, 2010. "Instrucción de Hormigón Estructural", Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, Gobierno de España.

[5] Dirección Nacional de Vialidad, Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2014. "Rehabilitación Ruta 24 de Uruguay mediante la aplicación de una capa adherida de hormigón con fibras sintéticas estructurales empleando Tecnología de Alto Rendimiento" en Pre-XVII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito.

[3] Sika. "Sika Informaciones Técnicas – Concreto reforzado con fibras"

[4] Miguez Passada, D et al. 2012."Desarrollo e implementación de un hormigón reforzado con fibras

[6] Barchip INC. The Synthetic Fibre Experts. Acceso: 06 Junio 2019. <https://barchip.com/>

Utilización de Cenizas de Biomasa en Materiales de Construcción

Rodrigo Matías Giménez Acosta¹

1. e-mail: rmgime@gmail.com

Resumen: El presente trabajo tiene el cometido de mostrar el estado de situación del residuo sólido, cenizas, de la quema de Biomasa para la obtención de energía, y de la importancia de la utilización de ese residuo, el que cada vez tiene más fuerte su impronta en el medio ambiente, de manera estratégica como material para la industria de la construcción. Ya sea como sustitución en parte del cemento Portland, o como agregado en el caso de materiales con base de matriz cementicia. Numerosos estudios se han realizado en diversas partes del mundo en éste sentido, ya que la utilización de la quema de la biomasa como combustible está siendo cada vez de mayor interés a nivel global, por ser la misma considerada un combustible ambientalmente amigable dado su característica de renovable. Se pretende por tanto, detallar a qué nos referimos cuando se habla de Biomasa como combustible, mostrar las posibilidades relevantes que pueden tener las cenizas residuales, mediante la referencia a estudios de investigación en ese sentido, detallar el estado de situación a nivel nacional y la tendencia de la valorización energética de la biomasa, además de las consideraciones que hay que tener cuando se realice un emprendimiento de utilización de cenizas como material en la construcción.

Palabras clave: Cenizas, Biomasa, Materiales Cementicios.

Abstract: The present work is pretended to show the situation of the solid waste, ashes, from the biomass burning to obtain energy, the importance of the use of this waste, which in present is being having a bigger footprint in the environment, and, however, can have a strategic use as a construction material in the construction industry. Either as a substitution in part of Portland cement, or as an aggregate in the case of materials with cement matrix base. Numerous studies have been carried out in different parts of the world in this same way, so the use of the biomass as fuel is becoming increasingly important globally, because the fact that it is considered an environmentally friendly fuel given because of its characteristic of renewable. Therefore, it is intended to detail what we refer to when talking about Biomass as a fuel, to show the relevant possibilities that residual ash can have, by referring to research studies in that way, to detail the national state of situation and the trend in the way of Biomass energy valorization, and, finally, to show the considerations that must be taken when carrying out an initiative of using biomass ash as material in construction.

Key words: Ash, Biomass, Cement based materials.

1. Introducción

En la actualidad el empleo de biomasa como combustible está en pleno aumento dada su particularidad de ser una fuente renovable y con nula carga de emisión de CO₂, ya que la tasa de consumo es semejante o menor que la tasa de crecimiento, por lo que es llamado como una fuente de Energía Verde. Lo cual lleva de la mano el problema con respecto a las cenizas residuales producto de su empleo, ya que atentan contra el medio ambiente, además con un claro impacto en lo social y en lo económico. La mayoría de las cenizas de biomasa son dispuestas en vertederos o "landfills" o dispuestas en campos agrícolas sin un debido control. En la actualidad, la disposición final de cenizas en vertederos es un problema debido al volumen generado y el poco espacio de los mismos.

Por otro lado, y como problema de mayor significancia, las cenizas de biomasa por lo general pueden tener contenidos considerables de metales pesados, los cuales ante la exposición al ambiente pueden lixiviar los mismos al terreno llegando a los cursos de agua subterránea o infertilizando terrenos con potencial agrícola.

El aumento a nivel mundial de la industria de la Construcción, ha causado una demanda mayor en la utilización de cemento. La producción del cemento necesita una masiva cantidad de materia prima y energía, y al mismo tiempo libera a la atmósfera una gran cantidad de dióxido de carbono en su fabricación. Se ha mostrado que por cada 600kg de cemento producido, se liberan unos 400kg de CO₂ al ambiente. Por lo que cualquier iniciativa que pueda ir en función de la utilización de cualquier residuo para la minimización de ese impacto de la fabricación tendrá dos claros beneficios, por un lado dar una solución en la disposición final del residuo y por otro minimizar el impacto de la fabricación del cemento.

Debido a que los compuestos químicos mayoritarios que están presentes en las cenizas de biomasa, principalmente en referencia a las de origen forestal, cerealera o agrícola, es que las mismas

tienen un potencial uso como material cementante. Tales como la presencia de Silica (SiO₂), Alúmina (Al₂O₃), Oxido Férrico (Fe₂O₃) y Oxido Cálcico (CaO).

De todas formas, la caracterización de la ceniza difiere una de otras por el tipo de origen, especie, tecnología de combustión, temperatura del proceso y tipo de biomasa. En el presente trabajo se pretende dejar de manifiesto que el hablar del término biomasa engloba un campo amplio de posibilidades de la misma, y que si bien existen estudios de utilización de éstas en materiales cementicios o como sustitución del cemento, cada iniciativa tiene que tener una particularidad establecida.

2. Desarrollo

Se detalla a continuación en primera instancia un acercamiento a la temática de biomasa, a la generación de las cenizas; luego se muestran jemplos de estudios de utilización de las cenizas en materiales cementicios y posteriormente se muestra la situación nacional respecto a ésta temática en cuanto a la utilización y tendencia hacia éste tipo de energía verde

2.1 Clasificación de Biomasa

El término biomasa refiere a cualquier material no fósil, orgánico biodegradable proveniente de plantas, animales o microorganismos. Esto incluye productos y subproductos de los mismos, así como los residuos agrícolas, forestales, industriales y urbanos. Los líquidos y gases generados en la descomposición de los materiales biodegradables orgánicos no fósiles también son considerados biomasa. [1]

Si bien en la actualidad la generación de energía en Uruguay a partir de Biomasa se da tradicionalmente, y principalmente, a partir de la del tipo forestal, ya sea virgen o residuos de la misma, así como también en lo referente a residuos cerealeros o de cosecha de cultivos, cabe señalar que ha habido investigaciones en el sentido de la posibilidad de utilización estratégica de otros

Virgen	Biomasa terrestre	Biomasa forestal Pastos o hierbas Cultivos energéticos Cosechas de cultivos
	Biomasa acuática	Algas Plantas marinas
Residuos	Residuos urbanos	Residuos sólidos urbanos Aguas residuales Gases
	Residuos sólidos agrícolas	Residuos de cosecha Abono y residuos de ganadería
	Residuos forestales	Corteza, hojas, ramas
	Residuos industriales	Madera de demolición, aserrín Aceite y grasa

Tabla 1 Clasificación de biomosas
Fuente: [1]

tipos de residuos agrarios y agroindustriales no tradicionales detallados en la Tabla 1.

2.2 Proceso de generación de ceniza a partir de Biomasa

Los elementos que forman las cenizas están presentes en la biomasa como sales unidas químicamente a la estructura del carbón (cenizainherente) o puede venir con la biomasa como partículas minerales de la tierra donde han sido cultivadas y son introducidos durante la cosecha y transporte (ceniza foránea). Una

fracción de los compuestos que forman estas cenizas es volatilizada y pasan a formar parte de la fase gaseosa. La cantidad que se volatiliza depende de las características del combustible, de la atmósfera alrededor de la partícula y de la tecnología del quemador. La Figura 1 muestra los mecanismos típicos involucrados en la formación de ceniza durante la combustión de biomasa. Los metales y óxidos son parcialmente evaporados en las altas temperaturas dentro de las partículas de combustible y pasan a formar parte activa en reacciones en la fase gaseosa. En su recorrido por la caldera precipitan cuando baja la temperatura

Figura I

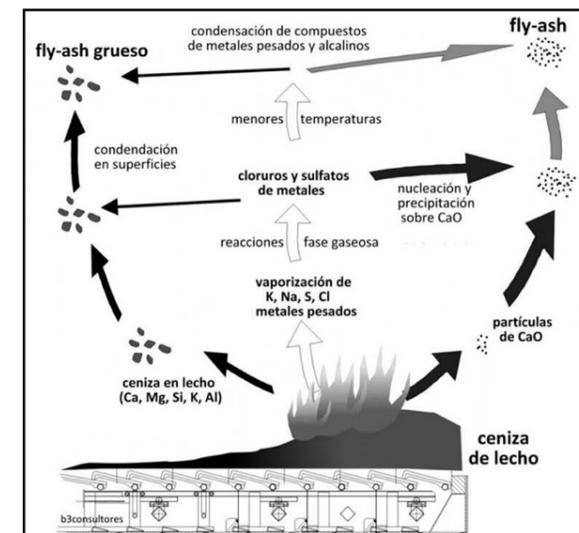
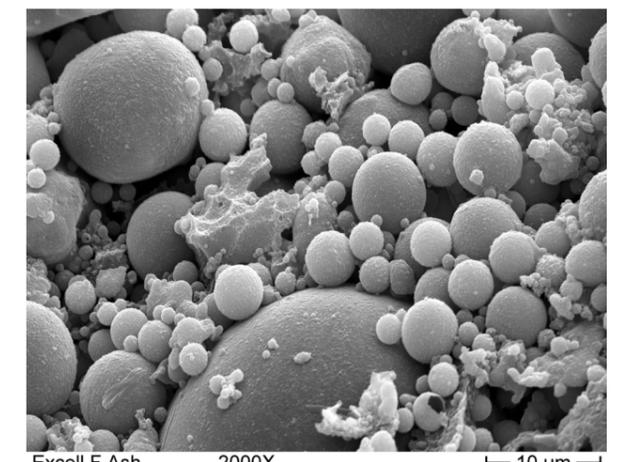


Figura II Micrografía de ceniza tipo Fly-ash
Fuente: <https://tanktransport.com/2018/03/fly-ash-gaining-users/>



y pueden nuclearse en superficie de finas partículas de CaO, pasando a formar parte de los gases, en lo que es denominado fly-ash (tamaño < 1µm). Debido a un proceso de reoxidación-nucleacióncoalescencia estas partículas se aglomeran componiendo un tipo de ceniza de tamaño mayor a 10 µm, denominado fly-ash grueso. Esto resulta en unas partículas de ceniza que tienen una amplia gama de composiciones, tamaños y formas relacionadas a las características del mineral del cual provienen [2]. En la figura II se puede visualizar una micrografía de ceniza tipo fly-ash.

2.3 Composición Química de la ceniza

La composición de cenizas está dominada por SiO2 y CaO, y en menor medida por óxidos de Magnesio, Aluminio, Potasio y Fósforo [3]. La ceniza proveniente de árboles tiene, por tener largos períodos reproductivos, una composición mineral muy diferente a las plantas que se cosechan varias veces al año, como los cereales. Además, contienen substancialmente menores contenidos de metales pesados. (Tabla 2)

Tabla 2 Composición química típica de cenizas Fuente: [2-3]

	chip madera	corteza	cereales
ceniza total	<2%	3% - 8%	5% - 10%
Composición ceniza, %			
SiO2	25	25	35-60
Al2O3	5	7	2
Fe2O3	2	4	2
CaO	45	40	7
Mgo	5	7	3
K2O	5	5	20-30
P2O5	4	2	6
Contenido de metales pesados en cenizas, en ppm			
Pb	25	25	10
Cd	5	5	1
Zn	400	600	250
V	40	60	5
Cr	50	150	15
Ni	60	100	4

2.4 Tecnologías de quema de biomasa en Uruguay

Las tecnologías utilizadas en Uruguay para quema de biomasa son de tres tipo: basadas en lecho fijo, en lecho móvil y en lecho fluidizado [4].

Las mismas conforman principalmente equipos de gasificación, calderas y quemadores de diferentes industrias que utilizan éste tipo de combustible en sus procesos.

3. Utilización de Ceniza en Materiales de Construcción

Se detallan a continuación diferentes posibilidades que se han estudiado de la utilización de cenizas provenientes de quema de biomasa tanto en diversas partes del mundo como así también en Uruguay.

3.1 Ceniza forestal en materiales de construcción basados en cemento en EEUU y Canada

La ceniza forestal consiste en dos tipos diferentes de material, por un lado tenemos la ceniza volante

Tabla 3 Resistencias según porcentaje sustitución de cemento por cenizas Fuente: [7]

[%]		Weight [Kg]		Crushing Load [KN]		Compressive Strenght [N/MM²]		Average [N/mm²]	
		28 day	60 day	28 day	60 day	28 day	60 day	28 day	60 day
0	A	7,84	7,86	535,00	498,00	23,78	22,13	23,96	24,15
	B	8,58	8,08	540,00	590,00	24,00	26,22		
	C	8,25	7,92	542,00	542,00	24,09	24,09		
10	A	7,95	8,08	270,00	312,00	12,00	13,87	13,09	14,06
	B	7,94	7,80	324,00	329,00	14,40	14,62		
	C	7,80	7,90	290,00	308,00	12,89	13,69		
20	A	8,07	8,10	312,00	428,00	13,87	19,02	14,13	18,6
	B	8,08	8,06	322,00	410,00	14,31	18,22		
	C	7,95	7,98	320,00	418,00	14,22	18,57		
30	A	8,19	7,92	197,00	198,00	8,75	8,80	9,02	7,91
	B	7,90	8,04	208,00	186,00	9,24	8,27		
	C	8,21	8,08	204,00	150,00	9,07	6,67		
40	A	8,30	8,30	180,00	197,00	8,00	8,76	8,59	7,82
	B	8,50	7,98	204,00	149,00	9,07	6,62		
	C	8,10	8,04	196,00	182,00	8,71	8,09		

(o fly-ash) y por otro lado tenemos la ceniza gruesa de lecho.

Naik. Et al (2003) estudia la ceniza en base a 12 tipos diferentes de árboles en Estados Unidos y Canadá, teniendo en cuenta ésta diferenciación y llega a conclusiones de la posible utilización de las mismas según sus características. Como una primera instancia de resultado de test según el tamaño de las partículas de las diferentes cenizas, determina que la ceniza gruesa, por tener una granulometría homogénea, podría ser utilizada como sustitución al agregado fino en hormigón. Por ejemplo en utilización en ladrillos, bloques tanto de mampostería como de pavimentación. Mientras que el fly-ash puede llegar a ser utilizada como reemplazo parcial del cemento y de los finos en la elaboración de materiales en base de cemento. Las densidades de los dos tipos de cenizas resultaron en 548 kg/m3, para las finas, y 827 kg/m3 para las gruesas. Se visualiza que la ceniza volante, si bien no cumple lo dispuesto por la norma ASTM C618, para cenizas volcánicas o cenizas volantes de carbón, ésta posee propiedades consistentes con los materiales puzolánicos. Por lo que por estos resultados, las cenizas resultan una buena opción como material de reemplazo a los agregados utilizados para la elaboración de hormigones de limpieza, hormigones autocompactantes de baja resistencia (CLSMControlled Low Strenght Material) u hormigones de media resistencia. [5]

3.2 Ceniza forestal de residuo de aserrado agregada en pasta de fabricación de ladrillo

Algunos estudios se han realizado para la utilización de la ceniza proveniente de la quema de madera como combustible, como agregado en la masa de barro para la conformación de ladrillos cerámicos para uso como mampuestos en posteriores trabajos de albañilería.

Lo interesante del proceso es que al exponer las cenizas a altas temperaturas en la cocción de los ladrillos pueden ocasionar una mejora en la conformación estructural de las cenizas, completar as reacciones puzolánicas instituidas, y la producción de compuestos densos que actúan

también como filler en los poros de la masa de los ladrillos. [6]

Por lo que según estudios la utilización de la ceniza forestal en la masa de cocción de ladrillos resulta en productos de mayor densidad, mayor resistencia a la compresión, menor índice de absorción de agua, menor coeficiente de saturación y mayor resistencia a la abrasión.

3.3 Ceniza forestal como sustitución de cemento Portland en hormigón

Si bien se ha estudiado la posibilidad de obtener un hormigón de media o baja resistencia, es fundamental poder establecer una idea de optimización de la utilización porcentual de las cenizas en ésta sustitución. Abdullahi, M. et al (2006) estudia por ejemplo el caso de la utilización de ceniza de madera de residuo de una fábrica de panificados en la zona de Minna, Nigeria. Como resultado obtiene que el porcentaje recomendable para la ceniza del tipo que utilizó estaba en un 20% del cemento Portland normal. Con éste porcentaje visualiza que, si bien la resistencia a la compresión es menor que el hormigón de control, hay un incremento en relación a la resistencia obtenida para ésta dosificación en las resistencias de 28 y 60 días, por lo que se supone se podría llegar a incrementar éstos valores con edades mayores del hormigón endurecido [7]. Esto es debido a que la ceniza si bien no complace los estándares para establecerse como una puzolana, ésta igualmente tiene algunas características que la acercan a serlo.

En la tabla 3 se pueden visualizar los resultados de las resistencias a compresión obtenidas con los diferentes porcentajes de sustitución del cemento Portland en la elaboración del hormigón.

3.4 Morteros con incorporación de ceniza de bagazo de caña de azúcar

En países con alta producción de caña de azúcar se han estudiado la posible utilización de la ceniza residual de la quema del bagazo de la caña de azúcar utilizada como combustible en los procesos térmicos de generación de energía. Tales son

los casos de Brasil, el cual es el país con mayor producción de caña de azúcar y de sus derivados (azúcar y etanol), cuba y recientemente en investigaciones incluso en nuestro país.

Camargo et al. (2014) realiza un estudio de la utilización de la ceniza de bagazo como adición mineral en morteros. Se realizan ensayos de caracterización química y difracción por rayos X en morteros conteniendo 3, 5, 8 y 10% de CBC (Ceniza de Bagazo de Caña) como sustitución en peso del agregado fino [8]. La CBC utilizada en el estudio tiene bajo nivel de reactividad puzolánico, por lo que no es caracterizada como material puzolánico según la norma de referencia (NBR 12653), de todas formas se menciona que los métodos para la evaluación para material puzolánico son discutibles, por ejemplo Gava y Prudencio (2007) cuestionan el uso de características químicas y físicas, así como el grado de deformidad puzolánica empleada para su clasificación y selección [9].

El resultado del estudio arroja datos importantes como ser: que el proceso de molienda es una etapa muy fundamental, siendo el tiempo de molienda ideal 20 minutos, puesto que proporciona uniformidad granulométrica y también reducción del tamaño. Los resultados de resistencia a compresión mostraron elevados niveles para todas las proporciones de incorporación de CBC, atribuidos al efecto físico de llenado de vacíos por parte de granos finos. Hubo un aumento de la resistencia a tracción por compresión diametral, en las trazas que contienen 3% de CBC, en comparación a la traza de Control; por lo que fue considerada como la proporción óptima de reemplazo. La adición de finos de CBC para todas las proporciones de reemplazo, condujo a la reducción de absorción capilar, puesto que promueve el llenado de vacíos, previniendo el ingreso de agentes agresivos al mortero.

3.5 Ceniza forestal como sustitución en la elaboración de baldosas en base cemento de pavimentación

Jiménez, I. et al. (2016) realiza un estudio utilizando ceniza de quema de corteza de eucalipto

de una industria de producción de celulosa, con el fin de determinar la incorporación de la misma en matrices cementicias en la producción de materiales para la construcción. Realiza en primera instancia una caracterización los componentes, cemento Portland normal y de la ceniza en dos variantes, una de ceniza de partida, y otra, en la que la misma ceniza se la activa mediante un proceso de tratamiento hidrotermal.

Entre los posibles usos de la sustitución de la ceniza en las matrices cementicias se propone la utilización de la misma en la elaboración de baldosas de pavimentación. Los ensayos realizados confirman que la sustitución parcial de cemento por un 10-20% de Ceniza Forestal da lugar a una ligera disminución de las resistencias a flexión del material. Sin embargo, las matrices resultantes de esa sustitución presentan valores de Resistencia a flexión adecuados para su aplicación en baldosas. De hecho, la adición de CB (ceniza de biomasa) mejora el comportamiento del material en términos de resistencia al deslizamiento, a la abrasión y al impacto, que son las propiedades mecánicas a considerar para la aplicación de las baldosas en pavimentos. Por lo tanto, se confirma la viabilidad de la aplicación de estas matrices, tanto CB-10 como CB-20, en baldosas de mortero [10].

3.6 Ceniza de cáscara de arroz en la elaboración de cemento Portland Compuesto

Las cenizas de la quema de cáscara de arroz es un residuo producto de su uso en procesos energéticos de gran volumen. Las mismas poseen características químicas que les proveen un potencial de utilización como sustitución del cemento Portland. Numerosas investigaciones se han realizado en ese sentido, incluso en nuestro país.

Rodríguez, G. et al. (2015) demuestra en proyecto de investigación que a nivel nacional se puede elaborar cemento portland compuesto (CPC) mediante sustitución parcial de clinker por ceniza de cáscara de arroz residual (CCAR) provenientes de proyectos de generación de energía a partir de biomasa [11].

En dicho estudio se concluye que las cenizas de cáscara de arroz, si son acondicionadas adecuadamente mediante técnicas de secado, tamizado y molienda, se podrían utilizar para la elaboración de cemento compuesto. La misma se llega mediante una base a mezclas ternarias (Clinker + CCAR + Filler calcáreo), con diferentes porcentajes de sus componentes principales variando entre 10% y 35% de sustitución de clinker por CCAR + Filler calcáreo. Se demuestra que debido al alto porcentaje de dióxido de Sílice en su caracterización química y por los resultados luego de realizadas las modificaciones descriptas, se confirma su actividad puzolánica. Todas las mezclas estudiadas alcanzaron los requisitos químicos y físicos especificados por la normativa de referencia, de la misma manera con relación a los requerimientos mecánicos. En cuanto a la reacción álcali-sílice, las cenizas estudiadas tienen un comportamiento inocuo en relación a la reacción que pudiera ocurrir entre los álcalis del cemento y la sílice de las cenizas, lo que contempla el tema de durabilidad. Por lo tanto queda demostrada la viabilidad de la utilización de las cenizas e cáscara de arroz estudiadas como adición activa, junto

con filler calcáreo, sustituyendo parcialmente al cemento, teniendo por lo tanto un aspecto ambiental importante a considerar en cuanto a la disminución de las emisiones de CO₂ asociadas.

4. Panorama nacional respecto a la utilización de quema de Biomasa en matriz energética

Cada vez toma mayor impulso en Uruguay la utilización de Biomasa como combustible en los procesos térmicos industriales, debido en parte al costo relativo menor con otros tipos de combustible, y al fortalecimiento del sector principalmente forestal. Por otro lado existe una motivación adicional al poder comercializar la electricidad generada o sobrante con la red nacional de energía eléctrica. Lo cual provee un incentivo adicional en la evaluación estratégica de la viabilidad de negocio. En la actualidad existen plantas de generación térmica de electricidad y de cogeneración a partir de la utilización de biomasa como combustible, ya sea proveniente del sector forestal como de la utilización de la cáscara de arroz. Las plantas productoras de pasta de celulosa son un caso particular de la generación

Tabla 4 Listado generadores de energía - Biomasa

Fuente: [13]

Nombre de la empresa	Potencia Autorizada DNE (MW)	Potencia Instalada (MW)	Potencia Contrato con UTE (MW)	Potencia-Mercado APOT (MW)	Tipo de promoción legal	Autorización DNE - MIEM	Nro de Autorización	Departamento	Estado	Vuelva a la RED	Autogenera	Materia prima
Celulosa y Energía Punta Pereira S.A. Montes del Plata	180,0	180,0	80,0	-	-	10/3/2012 5/4/2015	481/012 581/015	Colonia	Operación	Si	Si	Licor negro/ Forestal
UPM	161,0	161,0	40,0	-	-	7/20/2007	471/007	Río Negro	Operación	Si	Si	Licor negro
Galofar S.A.	14,0	14,0	10,0	2,5	Decreto 077/006	9/22/2009	950/009	Treinta y Tres	Operación	Si	Si	Cáscara de Arroz
Weyerhaeuser Productos S.A. Los Piques	12,0	12,0	5,0	-	Decreto 397/007	12/9/2009	1401/009	Tacuarembó	Operación	Si	Si	Forestal
Bioener S.A.	12,0	12,0	9,0	3,0	Decreto 077/006	10/9/2007	651/007	Rivera	Operación	Si	Si	Forestal
Lumiganor S.A.	11,4	11,4	-	11,4	-	3/7/2014	120/014	Treinta y Tres	Construida	No	No	Forestal
Alur S.A. - Planta Bella Unión	10,0	10,0	5,5	-	Decreto 397/007	12/9/2009	1404/009	Artigas	Operación	Si	Si	Bagazo/ Forestal
Fenirol S.A.	10,0	10,0	8,8	1,2	Decreto 077/006	1/16/2008	016/008	Tacuarembó	Operación	Si	No	Forestal/ Cáscara de Arroz
Ponlar S.A.	7,5	7,5	3,5	4,0	Decreto 397/007	9/29/2011	050/011	Rivera	Operación	Si	Si	Forestal
Liderdat S.A. (Azucarito)	5,0	5,0	-	4,85	-	11/3/2008	951/008	Paysandú	Operación	Si	No	Forestal
Intendencia de Maldonado - Las Rosas	1,2	1,2	1,0	-	-	12/23/2005	2302/005	Maldonado	Operación	Si	No	Biogas
Lanas Trinidad S.A.	0,6	0,6	0,6	-	Decreto 367/2010	5/8/2013	251/013	Flores	Operación	Si	Si	Biogas
Estancias del Lago S.R.L.	0,8	0,8	-	-	-	8/20/2015	823/015	Durazno	Construida	No	No	Biogas
Fanapel	-	11,5	-	-	-	-	-	Colonia	No operativa	No	Si	Licor negro/ Forestal
Rincón del Albano	-	-	-	-	Microgeneración (Proyecto Biovalor)	-	-	San José	En construcción	-	-	Biogas
Aincón Blanco	-	-	-	-	Microgeneración (Proyecto Biovalor)	-	-	San José	En construcción	-	-	Biogas
Total	425,5	437,0	163,4	27,0								

con biomasa. Las mismas utilizan madera como materia prima para su proceso productivo y en el mismo se genera un subproducto (licor negro), que tiene capacidad de ser quemado en calderas de vapor especialmente diseñadas con tal fin, al igual que otros subproductos generados. La mayoría de los establecimientos se encuentran asociados a otros emprendimientos industriales consumidores de vapor, por lo que son centrales cogeneradoras [12].

En la Tabla 4 se puede visualizar un listado de empresas generadoras de energía mediante la utilización de Bioenergía en el país (informe agosto 2018) [13]. Tomando en cuenta la potencia de generación de cada planta podemos tener una idea de la cantidad en toneladas de ceniza residual que resulta de dicho proceso industrial. Una estimación aproximada podríamos hacerla con los siguientes datos, una planta de generación de 5MW de potencia consumiría 160 Ton/día de biomasa forestal, y una de 10 MW rondaría las 256 Ton/día. El porcentaje en peso de la ceniza residual en relación al Eucalipto utilizado como biomasa en Uruguay es del 2.7% [14]. Por lo que promediando podríamos decir, de manera muy simplificada que se consumiría 28.8 Ton/día por MW de potencia generada. Si tomáramos, sólo para una estimación, la suma de las empresas que tienen como biomasa la materia prima forestal, las mismas llegarían a los 67.9 MW de potencia, por lo que tomando el consumo simplificado detallado anteriormente estarían en el orden de los 1955.5 Ton/día de biomasa forestal, ergo se estaría hablando sólo por éste concepto de un total de 53 Toneladas de ceniza generadas por día.

5. Consideraciones Finales

Por lo expuesto anteriormente, es de importancia el considerar la utilización de las cenizas de biomasa en materiales de construcción para utilizar en los mismos un residuo que cada vez empieza a ser de mayor significancia, ya que es una clara tendencia tanto a nivel mundial como nacional la utilización de la quema de biomasa como un tipo de energía verde en los procesos.

Por otro lado, si bien existen estudios referidos a la temática, es claro que es de fundamental importancia el establecer claramente la caracterización química de la ceniza, y mediante ensayos establecer los parámetros relevantes de propiedades mecánicas, físicas, reológicas y de durabilidad de los materiales cementicios posibles. Ya que dependerá de ello la factibilidad de su utilización en la industria.

Debido a la heterogeneidad de tipos de cenizas diferentes que van de la mano con el tipo de proceso térmico, del origen y tipo de la materia prima, ya sea forestal, de corteza, de aserrado, de chipeado, de hojas y ramas menores, lo cual incluso va a depender de la especie, o por otro lado de origen agrícola, como restos de rastrojo de cosechas, o como cáscara de arroz, etc. Es fundamental el establecer claramente cuando se realice un estudio de la ceniza de un proceso de quema, establecer la corriente del combustible utilizado y la viabilidad del mantenimiento del mismo para poder determinar su caracterización y uso en materiales cementicios.

Hay un incremento a nivel nacional de la posibilidad de uso de biomasa de diferentes tipos para valorización energética. Incluso se han realizado estudios de tipos de biomasa no convencionales. Por lo que es bueno tener en cuenta que la tasa de generación de estos residuos pueden incrementarse aún más en corto o mediano plazo. Mayores investigaciones particulares de tipos de ceniza de biomasa de procesos industriales energéticos deberían realizarse e impulsarse para la utilización de éste residuo en materiales cementicios, como sustitución del cemento Portland, como adición en matrices cementicias o como sustitución en los agregados finos. Pensándolo incluso no sólo desde el punto de vista ambiental, sino también como actividad social de inserción en el mercado, como posibilidad económica de medianas o pequeñas empresas y como una posibilidad de disminución de costos para algunos rubros en relación a la industria de la construcción en su conjunto.

Referencias

- [1] Curto, P., Pena, G., Mantero, C., Siri, G., Tancredi, N., Amaya, A., Durante, A., Ibañez, A., Ernst, F., Braga, L., y Flores, M., 2017. Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrarios y agroindustriales no tradicionales. Montevideo: Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial - FINGUDELAR
- [2] Melissari, Blas. 2012. "Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa" Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica, núm. 10 (Jun.): 69-82.
- [3] Valter, V.A., and Zuccoli, L., trans. 2008. Wood Fuel Handbook. Legnaro, Italia: AIEL- Italian Agroforestry Energy Association.
- [4] Melissari, Blas. 2011. "Evaluación de Tecnologías de Quema de Biomasa en el Uruguay" Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica, núm 9 (May): 55-66.
- [5] Naik, T., R., and Kraus, R., N., 2003. "A New Source of Pozzolanic Material" Concrete International, núm 10 (Dec): 55-62.
- [6] Okunade, E., A., 2008. "The effect of Wood Ash Sawdust Admixtures en the Engineering Properties of a Burnt Laterite-Clay Brick" Journal of Applied Sciences 8(6), ISSN 1812-5654: 1042-1048.
- [7] Abdullahi, M., 2006. "Characteristics of Wood Ash / OPC Concrete" Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies" Issue 8, ISSN 1583-1078: 9-16.
- [8] Camargo, P., Pereira, A., Akasaki, J., Fioriti, C., Payá, J., and Pinheiro, J., 2014. "Rendimiento de morteros producidos con la incorporación de la ceniza de bagazo de caña de azúcar" Revista Ingeniería de Construcción, núm 29 (N° 2): 187-199.
- [9] Gava G. P., Prudencio Jr L. R. (2007), Pozzolanic activity tests as a measure of pozzolans performance. Magazine of Concrete Research, 59, 729-741
- [10] Jiménez, I., 2016. "Aplicación Integral en Construcción de Materiales Eco-Eficientes con Incorporación de Cenizas de Biomasa." Ph.D. thesis, Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid.
- [11] Rodríguez de Sensale, Gemma. Fondo Sectorial de Energía (ANII) FSE_1_2011_1_6476. 30 de Octubre 2015. Cemento Portland Compuesto con ceniza de cáscara de arroz: oportunidad para el ahorro energético y disminución de emisiones de CO2 en el proceso de elaboración de cementos de nuestro país. ANII – UDELAR – FING – IEM.
- [12] Proyecto URU / 10 / G31, 2012. Informe sobre tecnologías de mediano y gran porte para generación a partir de biomasa (resumen). "Producción de Electricidad a partir de Biomasa / PROBIO", MGAP, MIEM, MVOTMA
- [13] Dirección Nacional de Energía, PROBIO. Resumen Plantas Generadoras Biomasa en el Uruguay Versión 08/2018 Acceso: [http://www.probio.dne.gub.uy/cms/images/pdf/Listado_de_Generacion_Bioenergia_agosto_2018\(1\).pdf](http://www.probio.dne.gub.uy/cms/images/pdf/Listado_de_Generacion_Bioenergia_agosto_2018(1).pdf)

HORMIGONES ESPECIALES (2019)

Hormigón autocompactante

Obra: Aires del Norte, Lagomar

Madelón Iglesias Gordillo¹

1. e-mail: arqiglesiasgordillo@gmail.com



1. Datos de identificación

Se trata de un proyecto residencial “Aires del Norte, Lagomar”, Aerosur 2, ubicado en el padrón 47128, en Lagomar, Ciudad de la Costa, Canelones.

El proyecto y la dirección de obra son realizados por CASAS URU (empresa de desarrollo de proyectos inmobiliarios en Uruguay), y construida por NORTE, empresa constructora.

Son 30 viviendas de dos y tres dormitorios, en una planta o dúplex, con parrillero y espacios verdes propios de cada unidad.

Promovidas por la Agencia Nacional de Viviendas, construidas bajo el régimen VIS, Vivienda de

Interés Social, Ley 18.795, donde se realizan las exoneraciones tributarias tanto para el constructor como para el consumidor final.

2. Generalidades

El proyecto consta de la construcción de 6 bloques de viviendas unifamiliares. Cada bloque tiene diferentes tipologías de viviendas, las cuales son: 3 dormitorios planta baja, 2 dormitorios dúplex, 3 dormitorios dúplex.

La cantidad de cada una de las tipologías difiere en cada bloque y se distribuyen de la siguiente manera: Bloque A: 6 tipologías de 2 dormitorios. Bloque B: 4 tipologías dos dormitorios y dos de 3 dormitorios. Bloque C: 6

Figura 1: Planta de Ubicación/Planta general, (abajo).

Figuras 2 y 3: Planta baja del conjunto, (derecha).



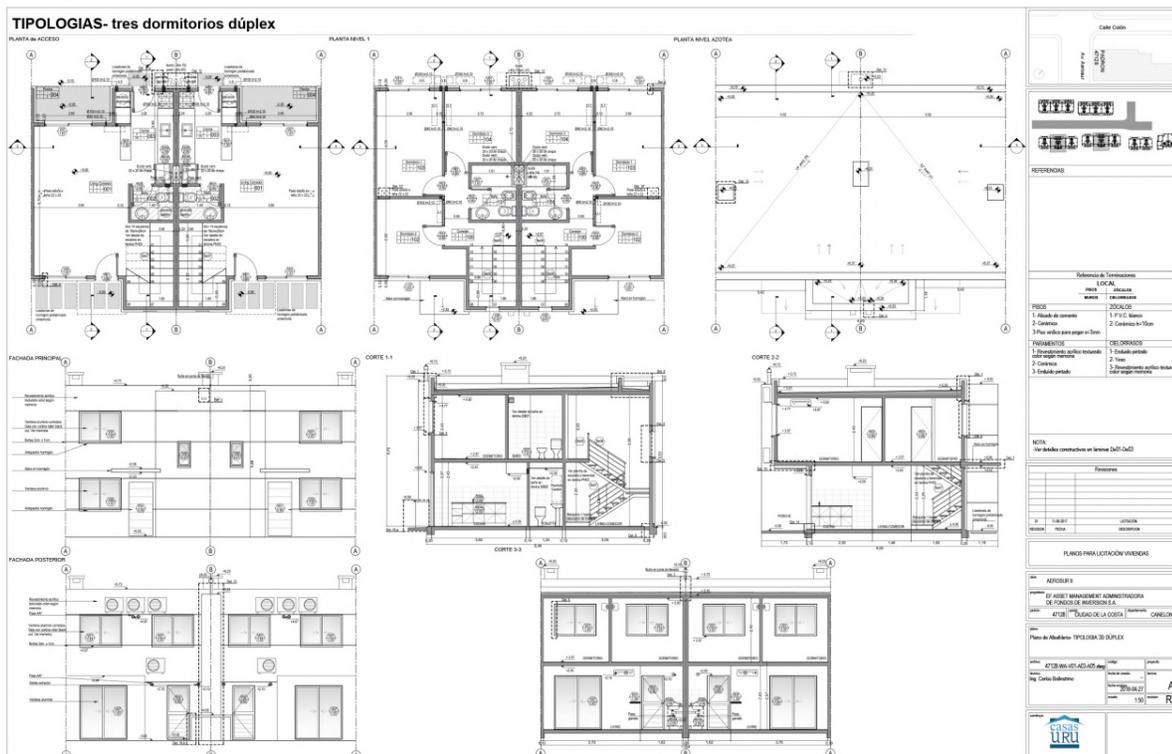
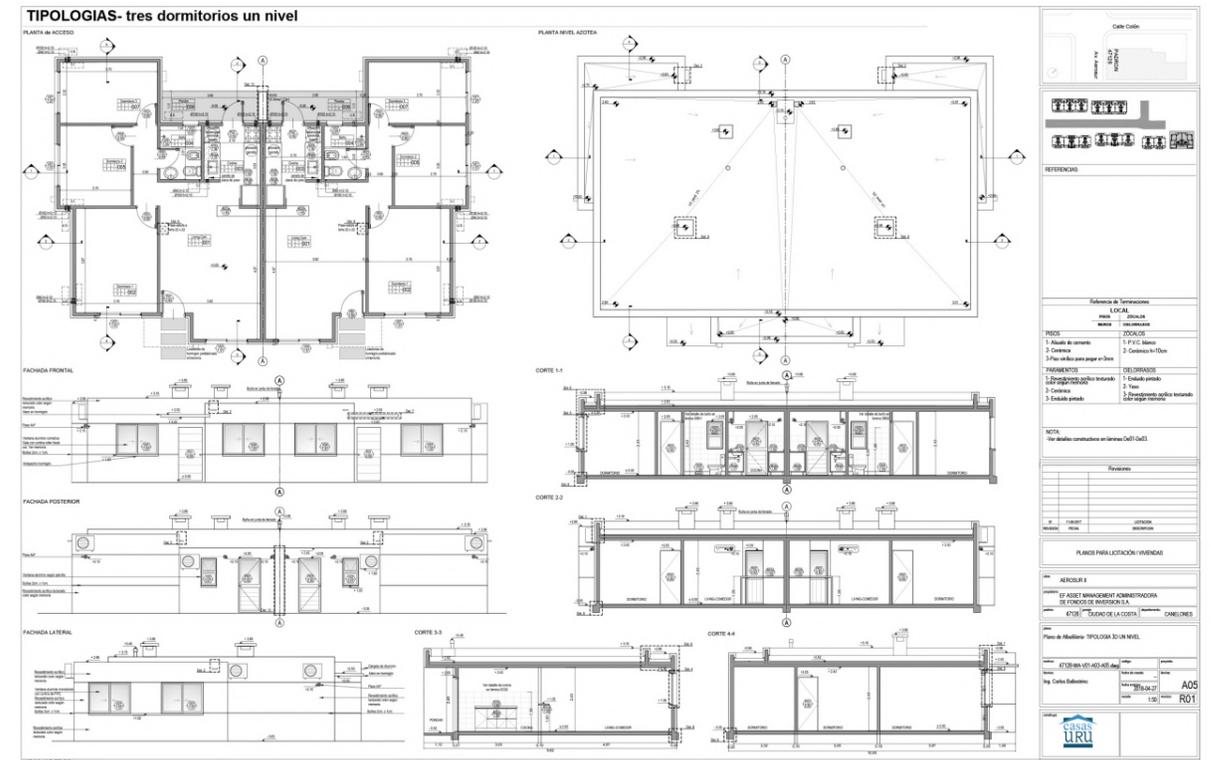
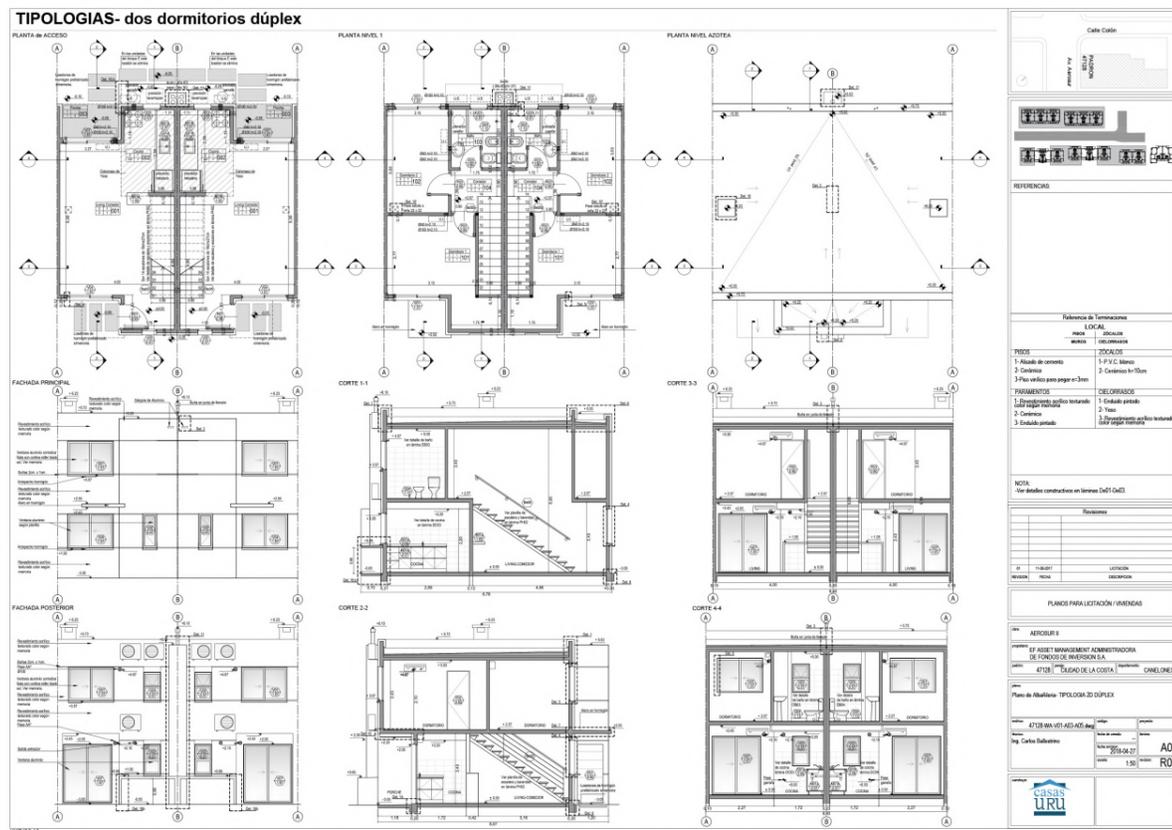


Figura 4: Tipología duplex 2 Dormitorios, (izquierda, arriba).

Figura 6: Tipología 1 nivel, 3 Dormitorios

Figura 5: Tipología duplex 3 Dormitorios, (izquierda, abajo).

A: 6 tipologías de 2 dormitorios. Bloque B: 4 tipologías dos dormitorios y dos de 3 dormitorios. Bloque C: 6 tipologías de dos dormitorios. Bloque D: 4 tipologías de 2 dormitorios y dos de 3 dormitorios. Bloque E: 4 tipologías de dos dormitorios. Bloque F: 2 tipologías de 3 dormitorios.

3. Descripción

Se resume en tipologías en tira realizadas con estructura de hormigón, con moldes de aluminio

para hormigón. El sistema es FORSA Colombiano. Una vez armado definido el proyecto, se envía a FORSA Colombia, quienes realizan los ajustes y envían la panelería a Uruguay.

La cimentación es en platea con vigas de borde, realizadas en hormigón C20, los muros son de Hormigón Autocompactante HAC 25, suministrado por la empresa CONCREXUR, y las losas se realizan en hormigón conveccional C20, suministrado por la misma empresa.

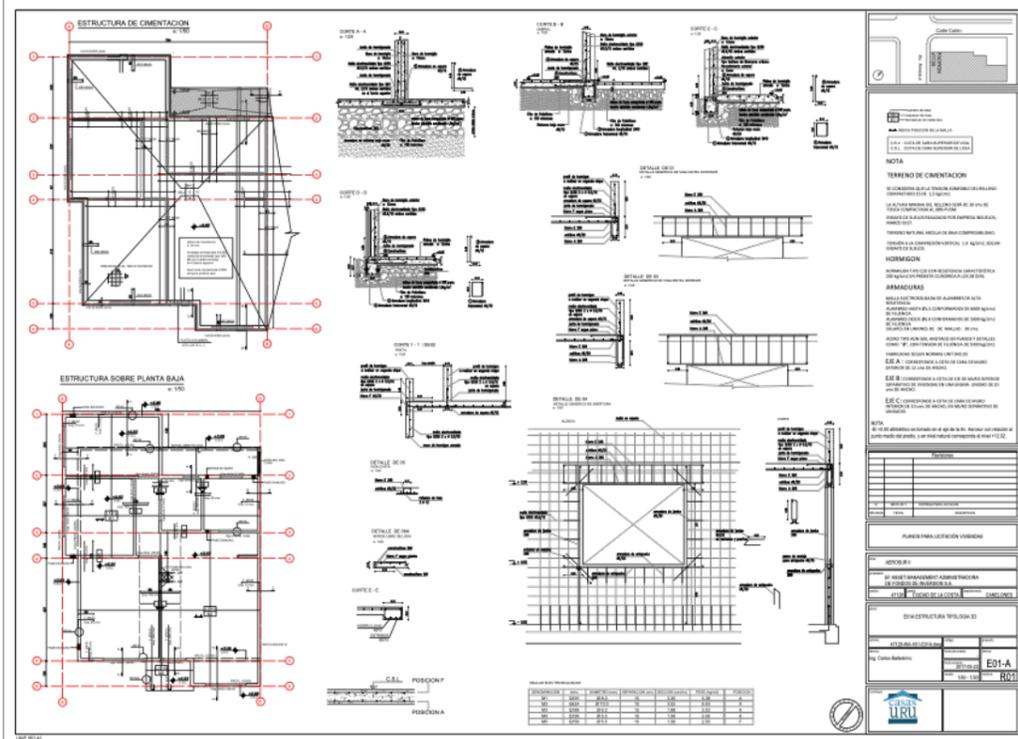


Figura 7: Estructura tipología 3 Dormitorios

Figura 8: Estructura tipología 3 Dormitorios, detalles.

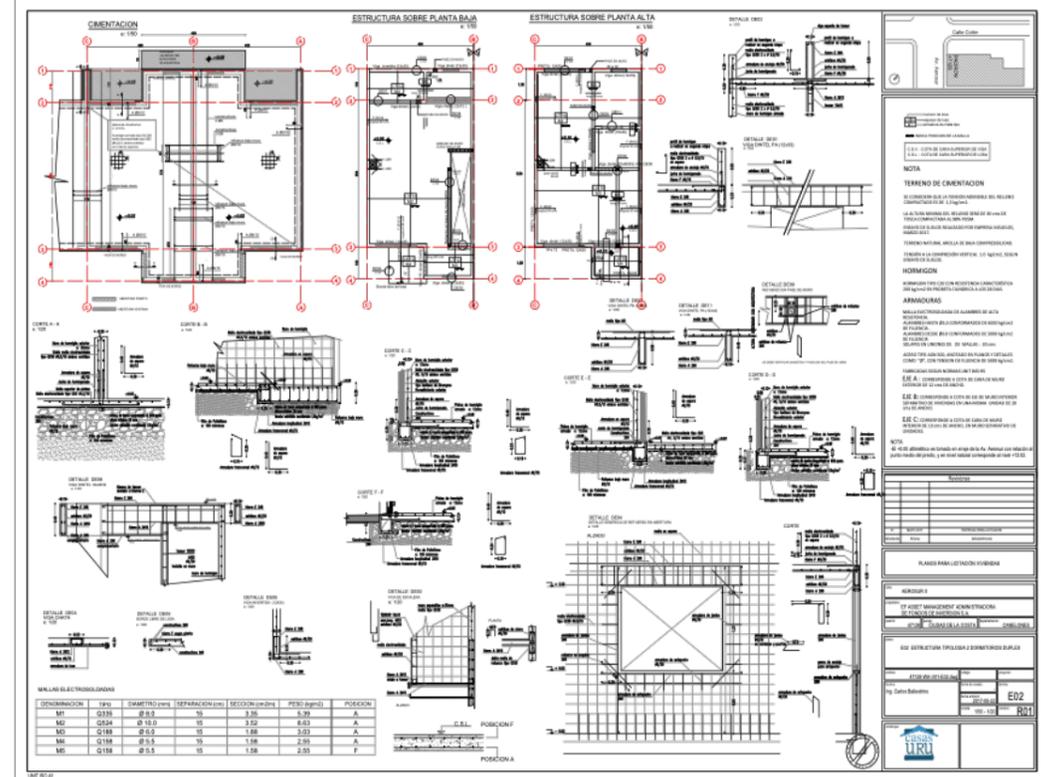
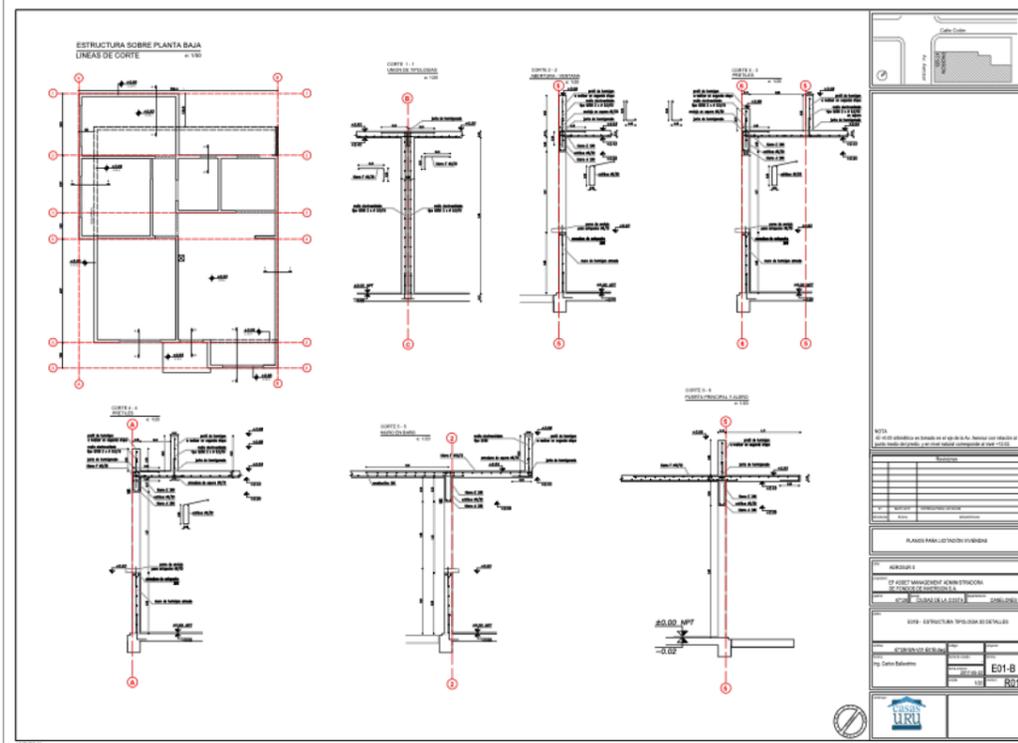
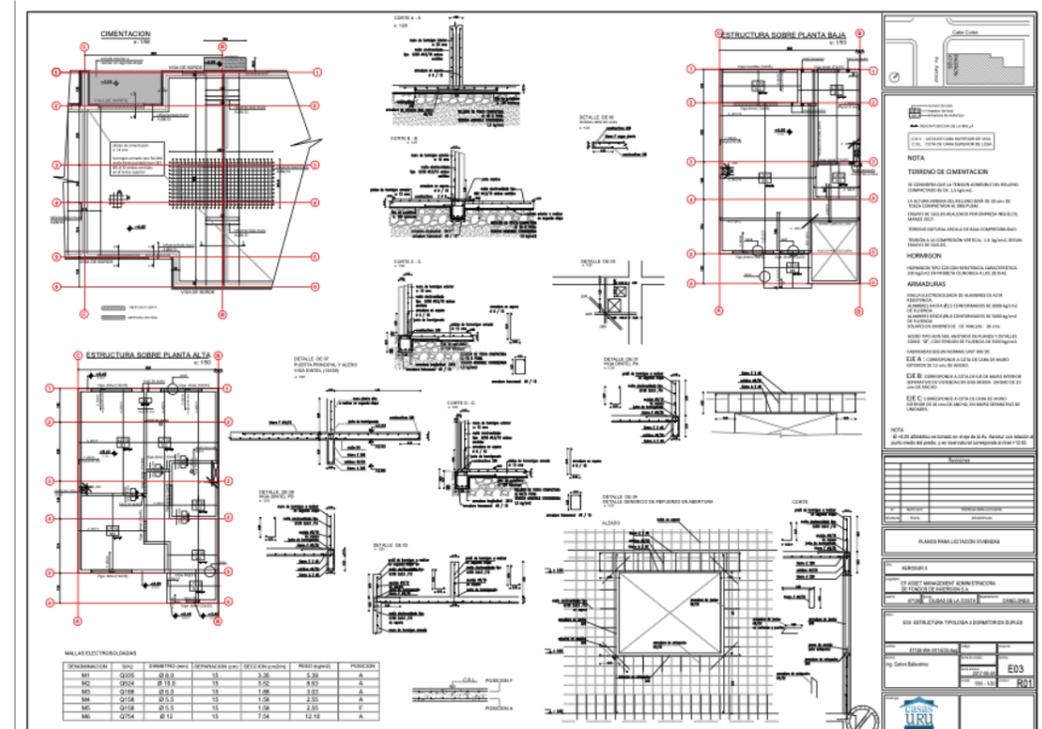


Figura 9: Estructura tipología 2 Dormitorios, dúplex

Figura 10: Estructura tipología 3 Dormitorios, dúplex.



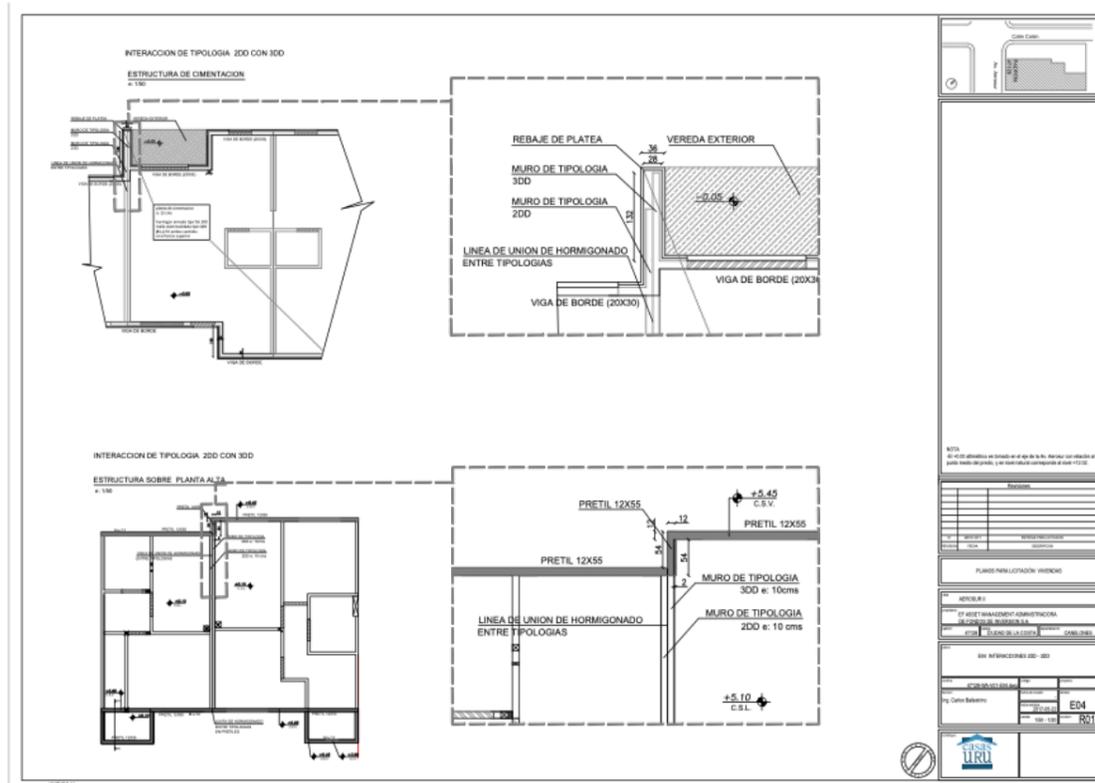
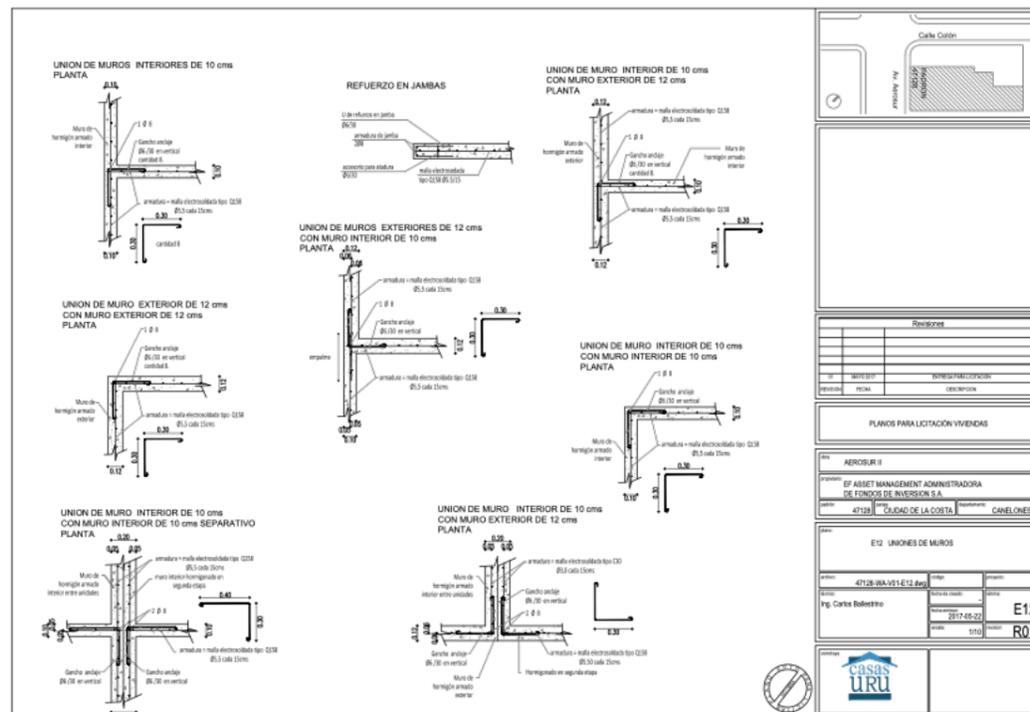


Figura 11: Encuentro entre tipología de 2 y 3 dormitorios



Figura 12: Encuentros de muros de HAC.

Figura 12: Encuentros de muros de HAC.



4. Procedimiento constructivo

Para las viviendas se utiliza en todos los casos, hormigón pre-mezclado y bombeado.

Las plateas sobresalen del plomo exterior de los muros de hormigón armado; bajo las mismas se coloca un nylon de 150 micrones. Se realiza control estricto de los niveles de la misma, de forma de poder apoyar correctamente los moldes.

Se utiliza Sistema Forsa, un sistema de moldes de aluminio para muros, entrepisos y cubiertas, que poseen distintos tamaños, los más comunes son de 60, 45 y 90 cm de ancho, y largo 240 cm.

Se replantean todos los muros, se levantan las mallas electrosoldadas, se ata a las mismas los corrugados de eléctrica así como los negativos de poliestireno expandido para la colocación posterior de cañería sanitaria, así como también para pases y ductos, de forma de evitar el picado

posterior; se colocan los moldes verticales de muro y luego los de la losa, apuntalando casa uno de ellos y fijándolos mediante corbatas que atraviesan los moldes.

Los muros se llenan con hormigón autocompactante como forma de lograr una buena terminación sin compactarlo, sin utilizar vibrador, debido a que son muros angostos, de 10 y 12 cm, donde el llenado puede resultar complejo si se hiciera con un hormigón convencional. En la memoria particular se describe que está terminantemente prohibido el llenado de muros con hormigón que no sea autocompactante.

Los pretilos de azotea se ejecutan en segunda etapa, con moldes de aluminio, se toman las previsiones necesarias para que no haya fisuras en la unión horizontal de los llenados.

Los entrepisos se realizarán con losas de hormigón armado. Se utilizan desmoldantes solubles en



Figura 14: Negativos previo al llenado para instalación sanitaria.



Figura 15: Instalación colocada posterior al desencofrado.

agua, madefer es la marca utilizada. Se desmolda a las 24 horas.

Los aleros están realizados como continuación de la losas de entrepiso. Llevan goterón en el hormigón, el mismo ya viene contemplado en el encofrado para lo cual hay una pieza específica prevista en los moldes.

La junta de llenado entre viviendas en azotea se sella con sellador poliuretánico y se coloca una faja de membrana asfáltica en todo en ancho de la junta, subiendo por el pretil hasta igual altura de remate que la impermeabilización general de la azotea.

Con respecto a los muros y pretil se sella antes de colocarse las capas de terminación, con sellador poliuretánico tipo Sikaflex 1A.

Sobre la cara exterior de los muros de hormigón exteriores se sellan las perforaciones de las corbatas (espadas de encofrado de aluminio) con cordón de respaldo y sellador poliuretánico tipo Sikaflex1A.

En todo el perímetro de las aberturas sobre muro exterior (antepechos, mochetas y dinteles), se aplica impermeabilizante cementicio tipo Superseal.

En las fachadas de las viviendas, sobre el hormigón posterior a su desencofrado, se realiza un puente de adherencia hormigón – Isolteco. Previo a la proyección del Isolteco en las caras exteriores de muros de fachada, se aplica sobre la superficie de hormigón un puente de adherencia acrílico compatible entre los dos materiales.

Se proyecta sobre los muros exteriores de hormigón en sus caras exteriores, revoque termoaislante “ISOLTECO” de Bromyros. El espesor total de la capa proyectada es 7 cm.

Se aplica sobre el revoque térmico y a modo de terminación exterior, revestimiento acrílico texturado impermeable con color para exteriores, tipo Weber Plast Super Iggam, el cual va llaneado. El llaneado con isolteco mejora el rendimiento del weber. En lugar de utilizar 4 kg/m², la superficie lleva 2kg/m².

En el interior, se desbastan los muros con copa diamantada, se le da una capa fina de microcemento y luego se cubre con enduido. Finaliza con pintura para interiores.

Todos los muros exteriores son de 12 cm de espesor, armados con malla electrosoldada tipo Q158 (diám. 5,5 / 15) de SIMA-ACINDAR, salvo en casos donde el muro divisorio se transforma en muro exterior, en dicho caso el espesor es 10cm.

Figura 16: Construcción de planta alta.



Todos los muros interiores son de 10 cm de espesor, estos son armados con malla electrosoldada tipo Q158 (diám. 5,5 / 15) de SIMA-ACINDAR.

Los muros medianeros entre viviendas pertenecientes a un mismo bloque, son de 20 cm de espesor total, 10cm correspondiente a cada vivienda.

Los pretils en todos los casos son de 12 cm de espesor, los mismos son hormigonados en una segunda etapa, e irán armados con malla electrosoldada tipo Q158.

Las escaleras de las tipologías dúplex se conforman por perfiles metálicos.

Debido a la utilización de un juego de moldes por tipología, se producirán juntas de llenado entre las viviendas apareadas. A nivel de azotea, pretils y fachada estas juntas son resueltas con un detalle que permite su sellado con Sikaflex 1 A a nivel del hormigón.

Figura 17: Impermeabilización de vanos posterior al desencofrado.





Figura 18: Fachada principal posterior al desencofrado.



Figura 19: Fachada principal en proceso de revoque.

5. Materiales empleados.

La cimentación y las losas se realizaron por recomendaciones del ingeniero calculista con hormigón convencional C20, y los muros perimetrales e interiores de las viviendas con HAC 25.

Se describe en memoria descriptiva particular para el llenado de los muros, el uso de hormigón autocompactante, con las siguientes características: “El hormigón autocompactante recomendado para el hormigonado de las viviendas, se refiere

Figuras 20 y 21: Fachada principal y posterior de viviendas duplex finalizadas con isolteco y weber.



Figuras 22 y 23: Interiores de las viviendas finalizadas, enduido y pintura sobre el muro de HAC.

a un hormigón de consistencia fluida y viscosa capaz de compactarse sin la aportación de la energía de vibración, rellenando los encofrados y escurriendo entre las armaduras sin que se produzca segregación de la lechada ni del árido

grueso, capaz de llenar perfectamente los moldes por la acción de su peso propio”.

La dosificación del hormigón es realizada por la empresa Concrexur, y los datos proporcionados

Figuras 24 y 25: Muestra de Gravilla (Lázaro) y de Arena gruesa (Pereira), con las que se dosifico el HAC de Aires del Norte, por empresa Concrexur.



por la empresa para la realización de la misma fueron los siguientes:

Para lograr un hormigón autocompactante se recomienda como cantidad mínima de material fino (cemento y adiciones) entre 400 y 600 kg/m³. Las características que afectan la cantidad de finos que se colocan dependen de:

Tipo de árido grueso que se utilice, forma y tamaño; la composición de las arenas; la resistencia requerida por el cliente; la durabilidad y la utilización de adiciones y aditivos.

Según los datos proporcionados, en los hormigones autocompactantes de Concrexur, no utilizan filler por temas logísticos y de producción.

El cemento portland utilizado es CPN 40 (Ancap). Los áridos utilizados son: Gravilla (Lázaro), Arena gruesa (Pereira), Arena Fina (TR y Teblix).

El agua utilizada proviene de pozo subterráneo, de osea y también agua de reciclado del lavado de camiones (nunca mayor a 20% del contenido total de agua). Para este reciclado poseen plantas de decantación, un reservorio y un tanque australiano, de donde finalmente se bombea a las bocas de suministro de la planta.

El Aditivo utilizado es visocrete 6. También usan en algunos casos el Sikament 290N, es el más usado, es un fluidificante, polifuncional, es un aditivo más robusto, no es tan sensible al agua. Los asentamientos son corregidos con un máximo 10 litros por metro cúbico.

Sobre la velocidad de mezclado del HAC, la velocidad del mixer cuando está bajo la balanza y se está cargando es de 14 a 17 vueltas por minuto, dependiendo del equipo.

La velocidad de transporte del HAC de planta hacia la obra es de 1 a 2 vueltas por minuto.

Figuras 26 y 27: Muestra de Arena Fina (TR y Teblix) y de CPN 40(Ancap), con las que se dosifico el HAC de Aires del Norte, por empresa Concrexur.



Figura 28: Aditivo VISCOCRETE 6 con el que se dosifico el HAC de Aires del Norte, por empresa Concrexur.

Figura 29: Los 5 componentes que integran este HAC.

La presión con la que se bombea el autocompactante, es de 100 bar de presión. Este el límite de trabajo de la bomba para no forzar ni dañar el equipo, pero si el hormigón lo requiriese podría aumentarse.

Norte la empresa constructora, lleva un control riguroso del material entregado en obra, el cual deja documentado, mediante los ensayos realizados, y las piezas hormigonadas, independiente de los controles que la propia empresa Concrexur también realiza y lleva registrado.

Se realizan ensayos por lo menos cada 10 m³ de hormigón ejecutado. Cada ensayo consta de 3 probetas de características normalizadas, son probetas cilíndricas de 10x20cm. Llenadas en las mismas condiciones que el hormigón puesto en obra, para que el resultado tenga un mínimo de valor estadístico y de dispersión.

Según los datos proporcionados, en caso de que los ensayos muestren que el hormigón tiene una resistencia menor a la solicitada, decisiones

derivadas del control de resistencia UNIT 1050:2001 /66.4, si resultase que $0.7f_{ck} < f_{est} < 0.9f_{ck}$, y a juicio de la Dirección de las Obras y con costos a cargo de la empresa constructora, proceden como se indica: Se estudian los elementos del lote para estimar la variación del coeficiente de seguridad del proyecto respecto al derivado de la incidencia de fest. Se realiza el ensayo que estime las características del hormigón puesto en obra, así como también los ensayos de prueba de carga.

En función de la información que resultare de los estudios y ensayos referidos, la Dirección de las Obras determina si los elementos que componen el lote son: aceptados, reforzados ó demolidos, quedando a cargo del contratista todos los costos que devengan las últimas opciones.

Si resultase $f_{est} < 0.7f_{ck}$, se procede al refuerzo ó demolición de los elementos del lote, quedando todos los costos (incluyendo el proyecto de recuperación de la estructura) a cargo del contratista.

Fck: resistencia característica a la rotura a los 28 días en cilindros normalizados, fest: resistencia característica estimada por ensayo.

SEGUIMIENTO ENSAYOS HORMIGÓN

Obra: AEROSUR

A continuación se informan los resultados de resistencia a la compresión de hormigón a partir de la rotura de probetas cilíndricas de 10cm de diámetro y 20cm de

Nº Probeta	Elaboración	Días rotura	Lugar colocación	Tipo hormigón	Origen	REMITO	Fecha Ensayo	ENVIADA	REMITO INTERNO	Tensión falla (Mpa)
21	7/12/18	14	F002 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55226	21/12/2018	11/12/2018	100039	35,03
22	7/12/18	40	F002 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55226	16/01/2019	11/12/2018	100039	40
23	7/12/18	14	F002 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55227	21/12/2018	11/12/2018	100039	19,11
24	7/12/18	48	F002 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55227	16/01/2019	11/12/2018	100039	40,53
30	12/12/18	30	F001 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55302	11/01/2019	18/12/18	100048	28,35
31	12/12/18	30	F001 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55302	11/01/2019	18/12/18	100048	30,78
32	12/12/18	30	F001 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55303	11/01/2019	18/12/18	100048	30,34
33	12/12/18	30	F001 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55303	11/01/2019	18/12/18	100048	28,32
40	15/12/18	30	E004 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55360	14/01/2019	18/12/18	100048	33,88
41	15/12/18	30	E004 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55360	14/01/2019	18/12/18	100048	32,91
46	18/12/18	30	E003 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55385	17/01/2019	15/1/19	99578	31,35
47	18/12/18	30	E003 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55385	17/01/2019	15/1/19	99578	30,08
52	20/12/18	28	E002 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55446	17/01/2019	15/1/19	99578	31,31
53	20/12/18	28	E002 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55446	17/01/2019	15/1/19	99578	29,58
61	15/1/19	14	E001 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55485	29/01/2019	21/1/19	99580	30,01
62	15/1/19	28	E001 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55485	29/01/2019	21/1/19	99580	32,56
67	17/1/19	14	D006 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55501	31/01/2019	21/1/19	99580	30,25
68	17/1/19	28	D006 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55501	31/01/2019	21/1/19	99580	28,18
73	22/1/19	14	D005 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55543	5/02/2019	21/1/19	99584	16,91
74	22/1/19	28	D005 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55543	5/02/2019	21/1/19	99584	19,68
79	23/1/19	14	E004 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55567	6/02/2019	21/1/19	99584	26,06
80	23/1/19	28	E004 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55567	20/02/2019	21/1/19	99584	30,85
85	24/1/19	14	D004 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55592	7/02/2019	28/1/19	99588	26,22
86	24/1/19	28	D004 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55592	21/02/2019	28/1/19	99588	23,86
91	25/1/19	14	E003 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55617	8/02/2019	28/1/19	99588	24,69
92	25/1/19	28	E003 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55617	8/02/2019	28/1/19	99588	27,82
97	28/1/19	14	D003 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55649	11/02/2019	29/1/19	99590	17,58
98	28/1/19	28	D003 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55649	25/02/2019	29/1/19	99590	21,03
107	29/1/19	14	E002 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55668	12/02/2019	30/1/19	99592	25,53
108	29/1/19	28	E002 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55668	26/02/2019	30/1/19	99592	29,81
113	30/1/19	14	D002 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55682	13/02/2019	31/1/19	99594	18,32
114	30/1/19	28	D002 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55682	27/02/2019	31/1/19	99594	23,59
119	31/1/19	14	E001 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55722	14/2/19	4/2/19	99597	29,31
120	31/1/19	28	E001 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55722	28/2/19	4/2/19	99597	31,64
125	4/2/19	14	D001 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55765	18/02/2019	7/2/19	99599	17,48
126	4/2/19	28	D001 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55765	4/03/2019	7/2/19	99599	19,52
131	5/2/19	14	D006 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	132761	19/02/2019	7/2/19	99599	25,42
132	5/2/19	28	D006 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	132761	5/03/2019	7/2/19	99599	31,23
133	5/2/19	14	D006 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	132763	19/02/2019	7/2/19	99599	28,15
134	5/2/19	28	D006 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	132763	5/03/2019	7/2/19	99599	28,11
139	6/2/19	14	C006 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55816	20/02/2019	11/2/19	99703	28,77
140	6/2/19	28	C006 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55816	6/03/2019	11/2/19	99703	28,89
145	7/2/19	14	D005 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55838	21/02/2019	11/2/19	99703	27,47
146	7/2/19	28	D005 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55838	7/03/2019	11/2/19	99703	21,14
151	12/2/19	14	C005 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55870	26/02/2019	14/2/19	99708	32,28
152	12/2/19	28	C005 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55870	12/03/2019	14/2/19	99708	32,33
157	13/2/19	14	D004 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55914	27/02/2019	14/2/19	99708	26,45
158	13/2/19	28	D004 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55914	13/03/2019	14/2/19	99708	24
163	15/2/19	14	C004 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55944	1/03/2019	18/2/19	99711	33,04
164	15/2/19	28	C004 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55944	15/03/2019	18/2/19	99711	35,86
169	18/2/19	14	D003 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55963	4/03/2019	20/2/19	99713	31,86
174	18/2/19	28	D003 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	55970	18/03/2019	20/2/19	99713	26,34
179	21/2/19	14	B006 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56023	7/03/2019	26/2/19	99716	31,87
180	21/2/19	28	B006 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56023	21/03/2019	26/2/19	99716	34,46
185	22/2/19	14	D002 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56030	8/3/19	26/2/19	99716	31,38
186	22/2/19	28	D002 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56030	22/3/19	26/2/19	99716	37,34
191	26/2/19	14	B005 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56070	12/3/19	28/2/19	99718	24,35
192	26/2/19	28	B005 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56070	26/3/19	28/2/19	99718	30,41
197	27/2/19	14	D001 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56083	13/3/19	28/2/19	99718	41,78
198	27/2/19	28	D001 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56083	27/3/19	28/2/19	99718	43,81
207	28/2/19	14	B004 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56117	14/3/19	6/3/19	99720	43,1
208	28/2/19	28	B004 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56117	28/3/19	6/3/19	99720	47,04
213	4/3/19	14	B006 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56173	18/3/19	6/3/19	99720	33,4
214	4/3/19	28	B006 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56173	18/3/19	6/3/19	99720	39,49
219	5/3/19	14	B003 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56195	19/3/19	7/3/19	99721	40,17
220	5/3/19	28	B003 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56195	2/4/19	7/3/19	99721	42,02
225	6/3/19	14	B005 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56224	20/3/19	8/3/19	99722	36,97
226	6/3/19	28	B005 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56224	3/4/19	8/3/19	99722	34,66
231	7/3/19	14	B002 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56245	11/3/19	8/3/19	99727	35,66
232	7/3/19	28	B002 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56245	4/4/19	8/3/19	99722	36,19
237	11/3/19	14	B004 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56286	25/3/19	14/3/19	99725	44,9
238	11/3/19	28	B004 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56286	8/4/19	14/3/19	99725	41,21
242	11/3/19	14	B001 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56291	25/3/19	14/3/19	99725	42,63
243	11/3/19	28	B001 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56291	8/4/19	14/3/19	99725	42,63
247	15/3/19	14	B003 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56338	29/3/19	19/3/19	99729	27,97
248	15/3/19	28	B003 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56338	12/4/19	19/3/19	99729	29,7
252	15/3/19	14	C002 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56343	29/3/19	19/3/19	99729	15,58
253	15/3/19	28	C002 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56343	12/4/19	19/3/19	99729	41,8
257	19/3/19	14	C001 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56386	2/4/19	22/3/19	99732	38,91
258	19/3/19	28	C001 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56386	16/4/19	22/3/19	99732	39,22
262	19/3/19	14	B002 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56390	2/4/19	22/3/19	99732	36,5
263	19/3/19	28	B002 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56390	16/4/19	22/3/19	99732	29,16
267	21/3/19	14	A006 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56443	4/4/19	26/3/19	99737	45,8
268	21/3/19	28	A006 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56443	18/4/19	26/3/19	99737	52,49
272	21/3/19	14	B001 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56448	4/4/19	26/3/19	99737	38,97
273	21/3/19	28	B001 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56448	18/4/19	26/3/19	99737	41,14
277	25/3/19	14	A005 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56488	8/4/19	27/3/19	99738	29,48
278	25/3/19	28	A005 - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56488	15/4/19	27/3/19	99738	32,6
283	26/3/19	14	C006 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56521	9/4/19	28/3/19	99739	41,06
284	26/3/19	28	C006 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56521	23/4/19	28/3/19	99739	47,17
285	26/3/19	14	C006 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56522	9/4/19	28/3/19	99739	35,44
291	27/3/19	14	A004 P.B - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56551	10/4/19	1/4/19	99742	32,34
292	27/3/19	28	A004 P.B - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56551	24/4/19	1/4/19	99742	34,01
297	28/3/19	14	C005 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56580	11/4/19	2/4/19	99744	45,3
298	28/3/19	28	C005 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56580	25/4/19	2/4/19	99744	46,37
303	1/4/19	14	A003 P.B - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56640	15/4/19	3/4/19	99746	43,36
304	1/4/19	28	A003 P.B - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56640	29/4/19	3/4/19	99746	38,42
309	3/4/19	14	C004 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56672	17/4/19	8/4/19	99750	26,8
310	3/4/19	28	C004 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56672	1/5/19	8/4/19	99750	43,83
315	4/4/19	14	A002 P.B - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56694	18/4/19	8/4/19	99750	29,99
316	4/4/19	28	A002 P.B - MUROS	HAC25	CONCREXUR	56694	2/5/19	8/4/19	99750	30,13
321	9/4/19	14	C003 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	133263	23/4/19	22/4/19	102605	38,85
322	9/4/19	28	C003 P.A - MUROS	HAC25	CONCREXUR	133263	7/5/19	22/4/19		



Figura 34 y 35: Colocación del HAC en muros de planta alta mediante bombeo.

Figura 36 y 37: Colocación del HAC en muros de planta alta y zona de transición con losa mediante bombeo.

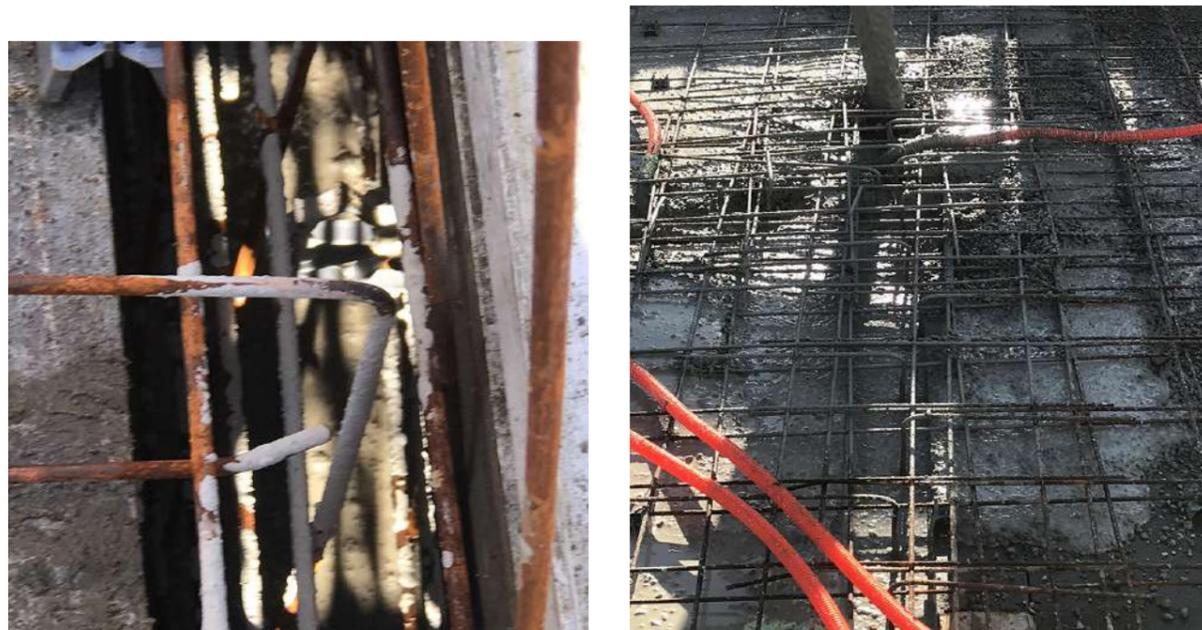


Figura 38: Encofrados metálicos apuntalados y sellados con poliuretano proyectado, para recibir el HAC.

del encofrado, como si fuese volcado pero mediante la manguera de la bomba. Sin embargo en la memoria descriptiva particular se dejaba por escrito que se llenarían los encofrados de abajo hacia arriba, evitando así la formación de burbujas entre el encofrado y la propia masa de hormigón. Debido a la consistencia fluida, se tiene mucho cuidado en la estanqueidad de los moldes, los encuentros de los mismos se rellenan con poliuretano proyectado.

Como se trata de un HAC, y conociendo la presión que el mismo realiza sobre los encofrados, mas aun cuando el llenado se realiza desde la parte superior del encofrado, se apuntalan los muros, ya que en los primeros llenados que se realizaron, tuvieron inconvenientes como la apertura del molde en su

cara inferior. Se realiza un hormigón convencional previo al llenado del autocompactante, que se vuelca desde su cara superior, de forma de sellar la base de los encofrados, previo a recibir el hormigón fluido, como lo es el HAC.

En obra, Concrexur, proveedor de hormigón autocompactante, realiza los ensayos y chequea los requerimientos del hormigón fresco previo a su colocación.

Se realiza, Cono de Flujo, ensayo T50 y VSI. El Ensayo de cono de Flujo: Permite examinar la fluidez y la homogeneidad en el borde (exudación). Sobre una superficie horizontal, y una placa de 90 x90 cm, se llena el cono de Abrams sin compactación alguna. Se levanta el cono hasta que



Figuras 39 y 40: Extracción de muestra de HAC para realizar los ensayos a pie de obra.

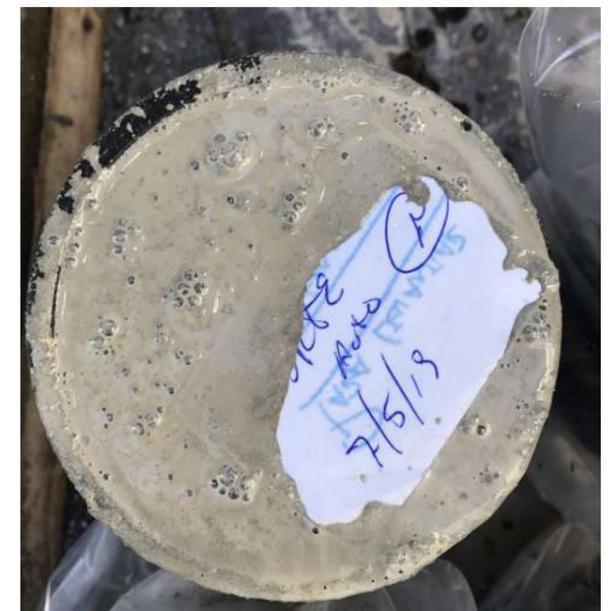
Figuras 41 y 42: Ensayo de cono de flujo y T50.



Figura 43: Ensayo de índice de inspección visual VSI 0

Figura 44: Probetas listas para llenado

Figura 45 y 46: Probetas del HAC etiquetadas, para enviar al Laboratorio posterior al fraguado



se vacíe completamente y se controla el tiempo que demora en alcanzar el diámetro de 50 cms. Este primer ensayo se denomina T50, y su límite máximo es que llegue en menos de 8 segundos.

Una vez alcanzado este diámetro, se realiza el ensayo de Inspección visual tolerándose los índices 0 y 1, rechazando el 2 y 3. En el caso que el día de llenado, estuviese presente uno de los laboristas de Concrexur, se permite que realice correcciones sobre el VSI 2.

En este ensayo se verifica la exudación y la existencia o no de segregación en el borde, para ello se verifica que no haya bordes sin árido grueso.

Se mide en dos diámetros perpendiculares, el diámetro final, se promedia y se acepta un diámetro entre los 65 y los 75 cm.

El día de visita a obra, día de llenado de muros de planta baja de una de las viviendas, se obtuvo un

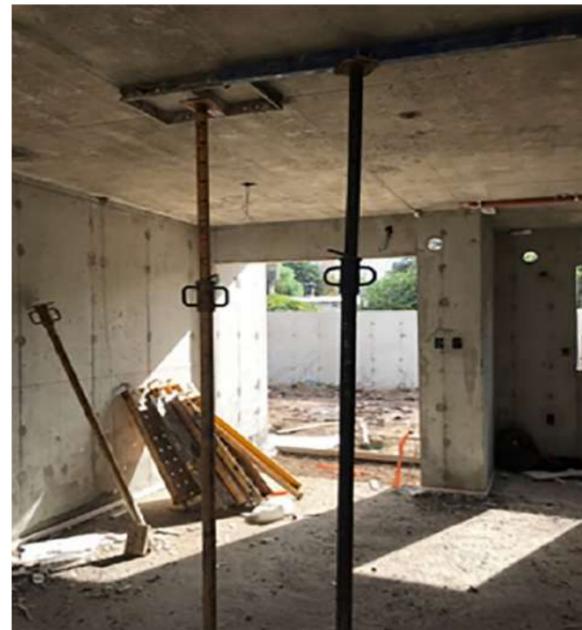
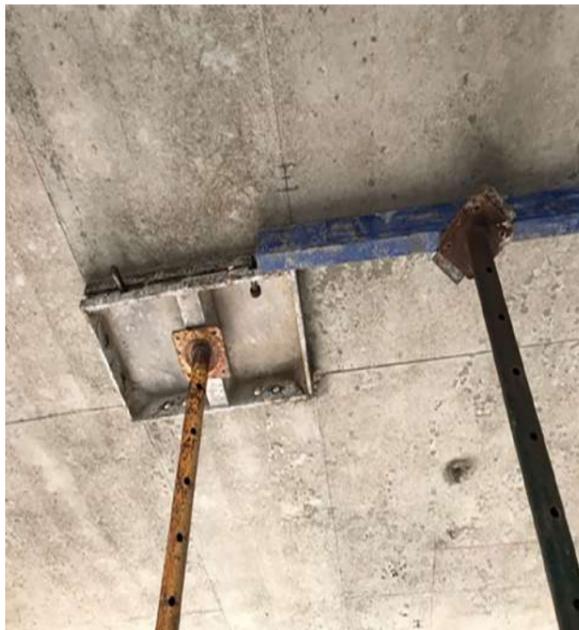
explayamiento de 70 cm y T50 de 6 segundos. El VSI fue de índice 0.

La dirección de obra, posee reglas generales sobre la temperatura en tiempos fríos en los días de llenado.

Se suspende el hormigonado siempre que:

- Que dentro de las 48 horas siguientes, pueda descender la temperatura media del ambiente por debajo de los 0°C. A estos efectos, el hecho de que la temperatura ambiente a las 9 de la mañana, hora solar, sea menor de 4°C, se puede tomar como suficiente para prever que dentro del plazo indicado se alcanzará el límite de temperatura establecido anteriormente.
- Que la temperatura de los moldes o encofrados sea menor a 3°C.
- También tienen precauciones para los días

Figura 47y48: Transición de puntales y losa (flp), al otro día del llenado, posterior al desencofrado.



calurosos, temperatura del aire mayor a 30°C:

- El tiempo de mezclado no puede exceder el mínimo especificado y el tiempo para el mezclado y colocación serán los mínimos posibles. Si las temperaturas son críticas, las operaciones de colocación del hormigón se realizarán de tarde.

- Las operaciones de colocación, son interrumpidas cuando la temperatura, velocidad del viento y humedad relativa ambiente impidan realizar las operaciones de colocación y compactación en forma adecuada, o perjudiquen la calidad del hormigón de la estructura.

- No se permite hormigonar con temperaturas mayores a 40°C o si se hormigona con temperaturas mayores a 35°C, se deberá prever un curado mediante riego de las superficies expuestas.

En obra se tienen dos juegos de moldes, correspondientes a planta baja y otro a planta

alta, todas las viviendas se realizan con este juego, por lo que se llena por sector, apareciendo juntas de hormigonado. Considerando esto, las juntas las ubican en las partes menos comprometidas de la estructura y orientadas de manera que los esfuerzos previstos para la pieza en esa sección, se desarrollen normalmente a la junta y de manera que tiendan a su unión con el nuevo material a colocarse. Para asegurar la mejor adherencia entre las partes de hormigón en contacto, se trata de que queden ásperas y bien limpias al recibir el hormigón fresco del siguiente llenado.

El sistema Forsa de encofrados, posee piezas de unión entre los muros y las losas, así como piezas de transición entre el puntal y la losa. Por lo que tenemos una etapa de desencofrado de las formaletas de losas (FL) y otra de desapuntalado de las formaletas puntales (FLP).

Se retiran de las formaletas de losa FL al otro día del llenado, dejando en su lugar las formaletas

Figuras 49 y 50: Acopio de encofrado metálico en obra



de losa puntal (FLP) hasta obtener la resistencia característica mínima necesaria para poder desapuntalar, que se consigue a los 7 días.

Para el desencofrado de las FL de las losas de planta alta, para esta tipología, es necesario contar con una resistencia mínima de 12 kg/cm² para el desencofrado de las formaletas de aluminio.

En las losas de planta baja, para las losas que soportan las cargas de los muros de planta alta, se considera como mínimo una resistencia de 48 kg/m², para una separación máxima entre apoyos de FLP de 1,5 m, antes de realizar el llenado de los muros de planta alta.

No es menor en este sistema, el espacio que ocupan estos encofrados, y el tiempo de limpieza y etiquetado de los moldes. Se reutilizan los moldes, cada molde tiene un plano, y todas las viviendas usan los mismos moldes. Se realiza como una producción en serie. El propio sistema consta con pasarelas de apoyo para la construcción de la planta alta, las mismas se fijan en los pases y con las corbatas del propio muro.

Se evita el uso de la estructura durante los primeros días, se toman precauciones especiales para no arrojar cargas o acumular sobre ellos materiales de cualquier índole.

Los parrilleros se llenan con el mismo sistema, la malla y los separadores, con moldes más chiquitos, con las corbatas para posicionar los moldes. El sistema tiene un alineador, para corregir la posición de los mismos.

La utilización de Hormigón Autocompactante, les permite cumplir con los plazos estipulados para la obra. Su colocación en los encofrados es muy rápida, con menor cantidad de mano de obra, lo que también en este punto les permite ahorrar una cantidad importante.

Les permite desencofrar al otro día y tener un acabado de la superficie perfecto. En algunas viviendas, esto no se logra debido a imperfecciones de los moldes, y como es de

nuestro conocimiento el HAC rellena y copia toda la superficie del encofrado.

La obra comenzó en Diciembre 2018, se estima que finalice en Diciembre 2019. Son 30 apartamentos, 28 duplex, y 2 casas simples. 58 llenados de HAC, posteriores a la cimentación que se realizó en hormigón convencional. Se llenan muros y losas en el mismo llenado.

Se encofran y se llenan dos casas por semana, 70 m² por dúplex, cada superficie de llenado es de 35 m². Cuatro llenados por semana, con un total de 48 m³ (0,3 m³ H / m²).

Se conformaron dos equipos de trabajo, uno para trabajar con los moldes sobre planta baja y otro sobre planta alta, de esta forma se formaban a los distintos equipos en los sectores, de forma que cada cuadrilla repitiera su trabajo, durante toda la obra, y así eliminar márgenes de error. Un equipo de 7 personas para planta baja y 7 personas para planta alta.

El HAC acompaña la lógica constructiva del sistema Forsa. Estas viviendas tienen un proceso constructivo muy concreto, sumamente específico, lo que le permite tener tiempos de obra menores a los realizados en construcción tradicional. A modo de resumen de lo ya expuesto, luego de realizarse la cimentación, la platea en este caso, se erige la malla electrosoldada, a la que ya se fijan los negativos en poliestireno expandido para abastecimiento y pases de ductos de ventilación. Se fijan también los caños corrugados para el enhebrado posterior de la eléctrica. Se coloca el encofrado y se llena. Una vez desencofrado, se pasa a la colocación de cañería sanitaria y enseguida de la prueba hidráulica, se tapan con arena y portland, se enhebra la eléctrica (al otro día del llenado) y se realizan terminaciones. No hay revoques, al interior es enduído y al exterior como ya se ha citado, revoque termoaislante y pintura. Las carpetas interiores se realizan con un hormigón autonivelante. Se colocan puertas de madera, aberturas de aluminio y pisos de porcelanato, y con eso finaliza el proceso de construcción de estas viviendas.

Según los datos proporcionados por el Arq. Jefe de Obra, el costo m² con forsa y el hormigón autocompactante, para este proyecto está en el entorno de los USD 1000/m², mientras que si

lo hicieran en tradicional sería, USD 1600/m². El costo del juego de encofrado de 30 m² con el cual se están haciendo las viviendas es de USD300.000.

7. Agradecimientos

En primer lugar agradecer al Sr Daniel Ognibene, encargado de programación y logística de empresa Concrexur, quien me puso en contacto con el Sr Felipe Parry y el Ingeniero Martin Ceroni, ambos pertenecientes a la misma empresa, quienes me concedieron la entrevista de aproximación al Hormigón Autocompactante.

Al Ingeniero Martín Ceroni, quien me otorgó una visita guiada por la planta de producción del HAC, donde pude presenciar las distintas etapas del

proceso, así como también el Laboratorio de control e investigación que posee la misma empresa. Quien también me permitió el acercamiento a la obra Aires del Norte, siendo Concrexur la empresa de suministro del HAC.

Al Arq. Joaquín Aguerre, jefe de obra en Empresa Norte, responsable de la obra Aires del Norte, quien me permitió la visita a obra el día de llenado de HAC, compartiendo su experiencia, y quien me proporcionó planos y memorias de la obra.

8. Referencias bibliográficas

[1]Sergio García-Gasco Lominchar, Vicente Mas Llorens, Eduardo Sáez-Bravo Picón. 2009. Piel de hormigón. Aspectos técnicos y estéticos del hormigón autocompactante.

[2]Dr. Ingeniero Manuel Burón Maestro, Dr. Ingeniero Jaime Fernández Gómez, Ingeniero Luis Garrido Romero.2006. "Hormigón autocompactante. Criterios para su utilización" IECA N° 887 (Abril).

[3]Ester B. Bermejo Nuñez. 2009. "Dosificación, propiedades y durabilidad en Hormigón Autocompactante para edificación." Ph.D. tesis, Universidad Politécnica de Madrid.

[4] E. B. Bermejo Núñez, A. Moragues Terrades, J. C. Gálvez Ruiz y M. Fernández Cánovas. 2008. "Permeabilidad y porosidad en hormigones autocompactantes" Anales de Mecánica de la Fractura 25, Vol. 2.

[5]CasasUru, Memoria constructiva particular, Proyecto Aerosur 2. 2018.

[6]UNIT. 1998. UNIT-NM 33:1998. "Hormigón – muestreo del hormigón en estado fresco".

[7]UNIT. 1998. Norma UNIT 69:1998. "Hormigón - Extracción, preparación y ensayo de testigos de estructuras de hormigón.

[8]UNIT. Norma UNIT 1082:2002. "Hormigón. Procedimiento para la preparación y el curado de probetas.

[9]UNIT. Norma UNIT NM 77:1998."Hormigón. Preparación de las bases de probetas y testigos cilíndricos para el ensayo de compression".

[10]UNIT. Norma UNIT NM 101:1998. "Hormigón. Ensayo de compresión de probetas cilíndricas"



Figura 54: Acceso a planta Concrexur.



Figura 55: Primer Boca de carga.

Anexo

En la visita a la planta de Concrexur, se observó las distintas etapas del proceso dentro de producción, hasta la carga del camión que lo transporta a la obra, así como también los distintos ensayos que se le realizan al cemento, y al HAC para la formulación de la correcta dosificación y el control de calidad de los mismos.

Es una única planta con tres bocas de carga. Se realizan aproximadamente 500 m³ por día

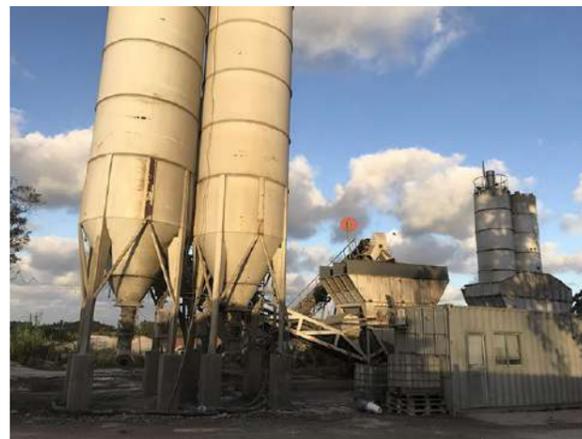
de producción de hormigón. Una de las bocas nuevas carga autocompactante, la otra el hormigón convencional y la más antigua se usa exclusivamente para hormigón de pavimentos.

La más antigua tiene 4 depósitos. Ascende el material a las 4 cajas, donde pesan los áridos, caen por gravedad a la caja de abajo donde está la balanza, suspendida en celdas de carga, y tiene para 4 tipos diferentes de áridos. Tiene un

Figura 56: Boca de carga 2.



Figura 57: Boca de carga 3.



Figuras 58, 59, 60: piletas de curado de probetas de hormigón y de cemento, con termostato y resistencia que permiten controlar la temperatura del agua de curado.

compartimento para piedra 20-30mm, otra para 5-20, y otra para arena previamente mezclada, gruesa y fina, más o menos 70-30%.

Las nuevas bocas, tienen compartimentos separados, arena gruesa, arena fina, pedregullo y gravilla. Son dos tolvas, una tiene escoria y la otra tiene cemento. Se realiza un control estricto en la

descarga de ambas. Del depósito cae a las celdas de cargas y de ahí cargan a los camiones.

El equipo Washington, nos permite medir el aire contenido en el hormigón. Se mide dos o tres veces por semana. El volumen del equipo es de 7 lts calibrado en %, es un manómetro pero calibrado en % de aire. Con pedregullo el criterio

Figura 61: equipo Washington.



Figura 62: Prensa de probetas de cemento. Tracción por flexión y compresión.





Figura 63: Ensayo de finura de cemento (izquierda).



Figura 64: Mesa de sacudidas, para compactación de las probetas de cemento (centro).



Figura 65: Ensayo de fraguado del cemento

de aceptación es 2 y 2,5 %, y con gravilla como es el caso del HAC entre 3, 3,5% de aire. Con la misma carretilla que extraen para realizar el ensayo del cono de flujo y probetas, contemplan los 7 litros para el equipo de Washington.

En el ensayo de finura de cemento por ensayo de vacío, se realiza con un tamiz al que se tapa, y lo que queda retenido en el tamiz se mide. Se ensaya con tamiz de 45 y 75 micras, el de la foto es de 45. A todas las tolvas de cemento se les hace el ensayo de finura.

Figura 51: Equipo de rayos x (composición química del cemento). x Figura 66: Consolas de control de plantas, del área de programación.



HORMIGONES ESPECIALES (2019)

Utilización de hormigón autocompactante

Altamira centenario - edificio de viviendas

Mariana Morales¹

1. e-mail: mail



El presente trabajo toma como caso de estudio una obra en construcción correspondiente a un edificio de 30 viviendas promovido por la Agencia

Nacional de Vivienda y amparado en la ley VIS. Esta ubicado en el barrio La Blanqueada sobre la calle Centenario esquina Escuder Núñez.

Desarrolla: Grupo Vinsoca Sur Entrega: Agosto 2019.

Comodidades: 30 Unidades de 2 y 3 dormitorios.

Ubicación: La Blanqueada, Av. Centenario 2954 esq. Pedro Escuder Núñez

Información extraída de sitio web: www.siserviciosinmobiliarios.com.uy

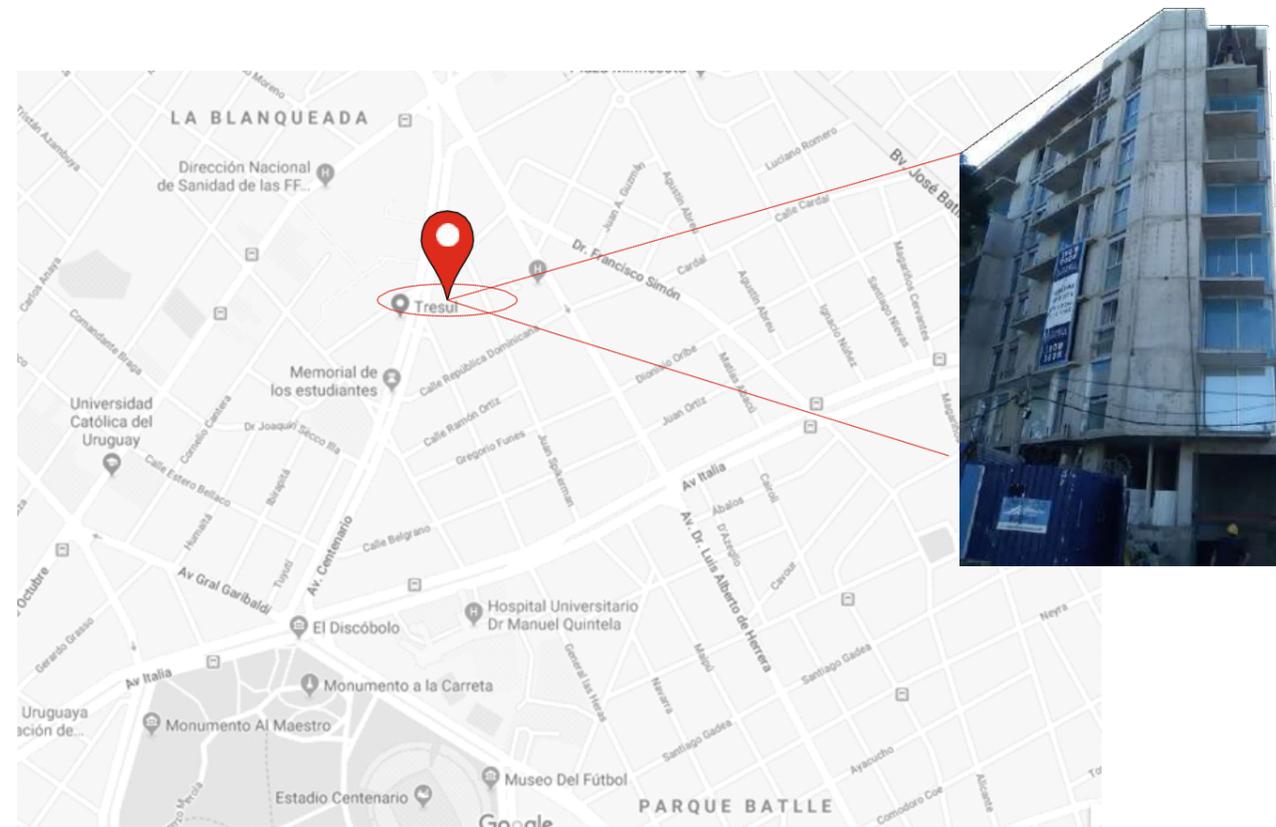
GENERALIDADES

La obra comenzó en Enero del 2018 cuenta con Subsuelo, Planta baja y 8 niveles por encima de la misma. Actualmente se encuentra en etapa de terminaciones.

metálicos de aluminio, que componen losas y muros, siendo estas completamente de hormigón armado.

El sistema constructivo utilizado, es el llamado SISTEMA FORSA que consiste en encofrados

La empresa participa de todas las etapas del proyecto, encargandose desde la compra del terreno, el proyecto arquitectónico, la construcción del mismo y posteriormente la venta de las unidades.



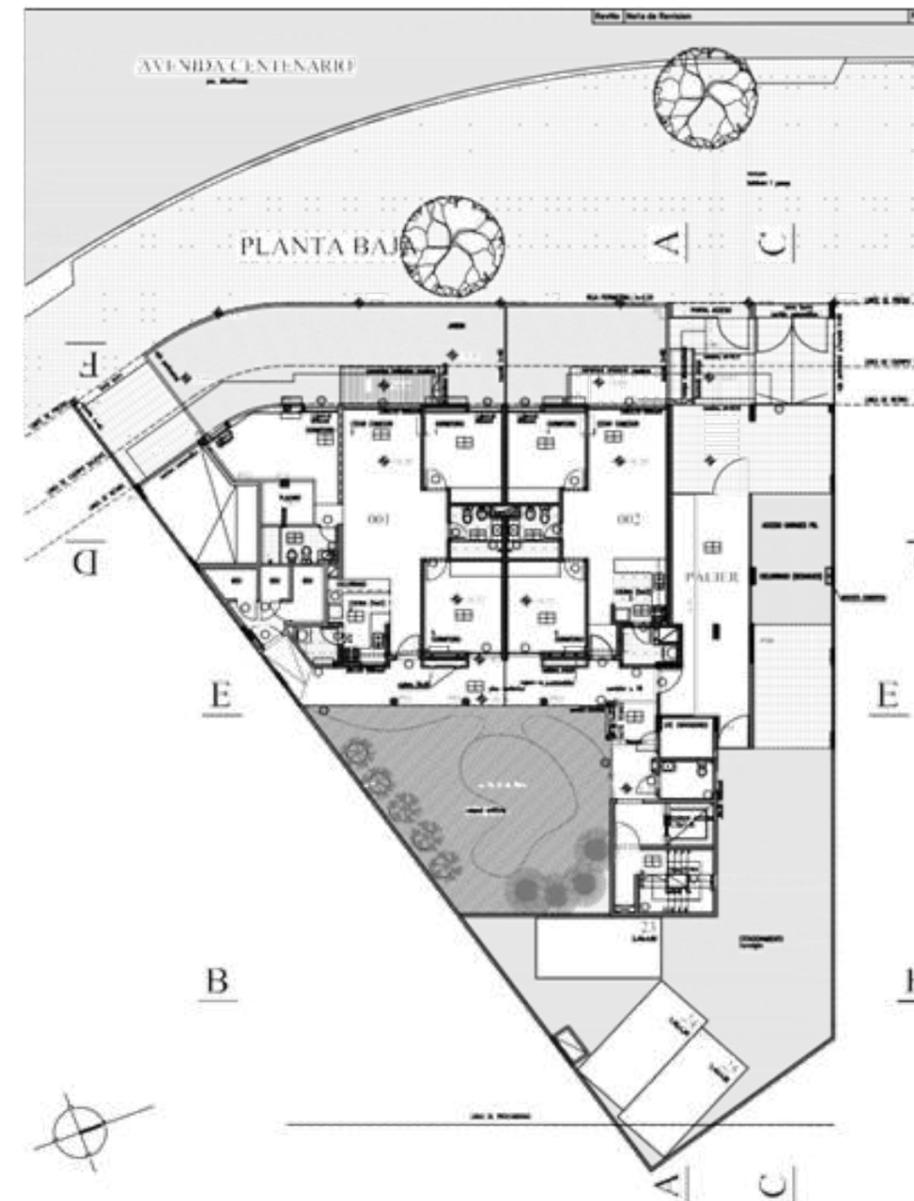
RECAUDOS GRÁFICOS DEL PROYECTO

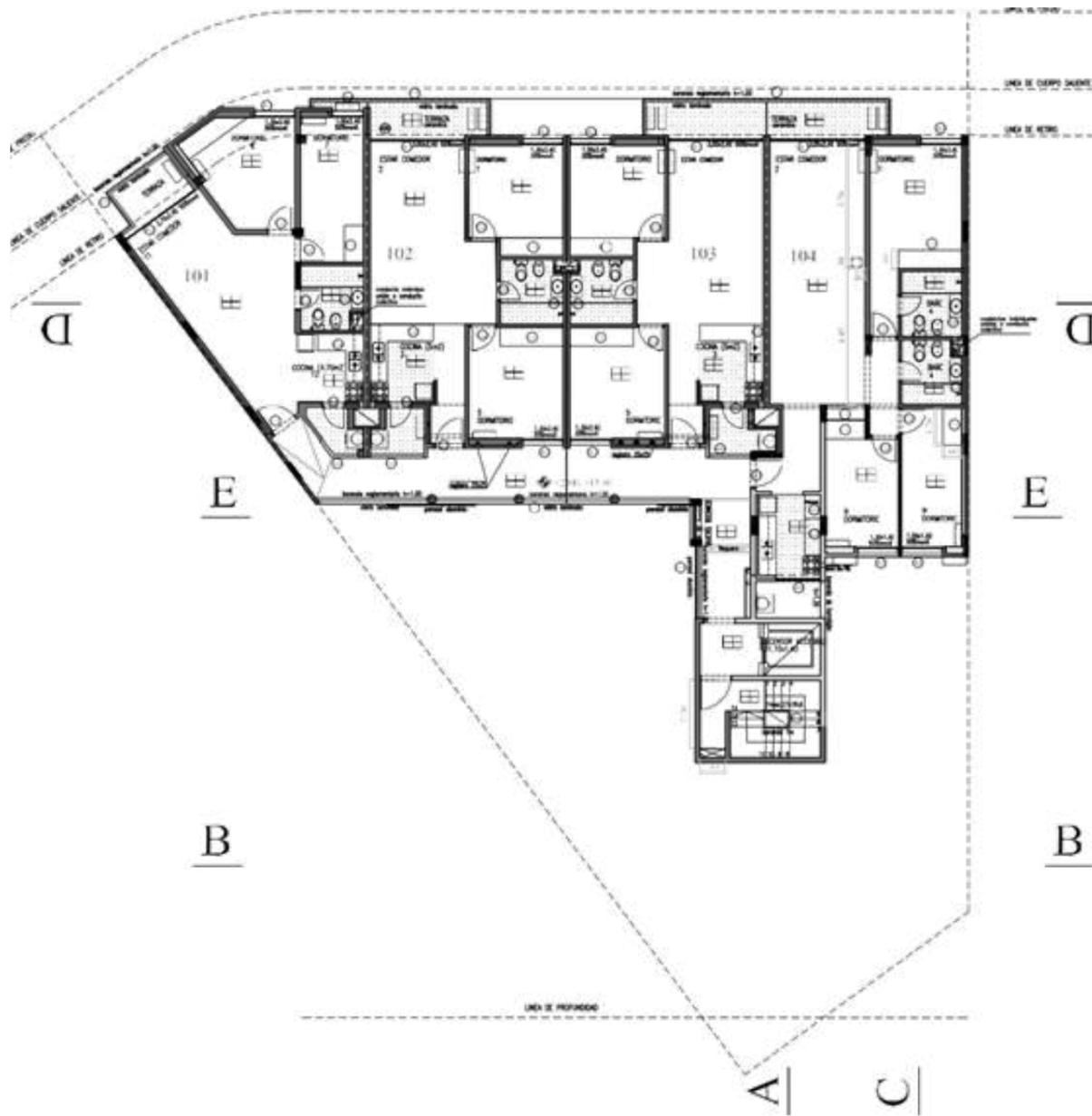
Considerando la utilización en obra del sistema de encofrado Forsa, y teniendo en cuenta que la empresa trabaja en todas las etapas del proceso, el proyecto arquitectónico se articula en función a la utilización de la modulación según las medidas de los moldes, generando tanto en las habitaciones como en las medidas de aberturas y pasillos, tamaños múltiplos de la modulación Forsa, para de esta forma facilitar en la etapa de

obra las tareas de encofrado y evitar adaptaciones engorrosas del sistema.

Algunas de las estrategias proyectuales son: generar ventanas de piso a techo, para eliminar los moldes pequeños como antepechos, habitaciones cuyas dimensiones sean múltiplo de 60cm (ancho de formaleta de muro). Generar muchetas en muros exteriores para albergar luego la aislación térmica y emplacado de placa de yeso.

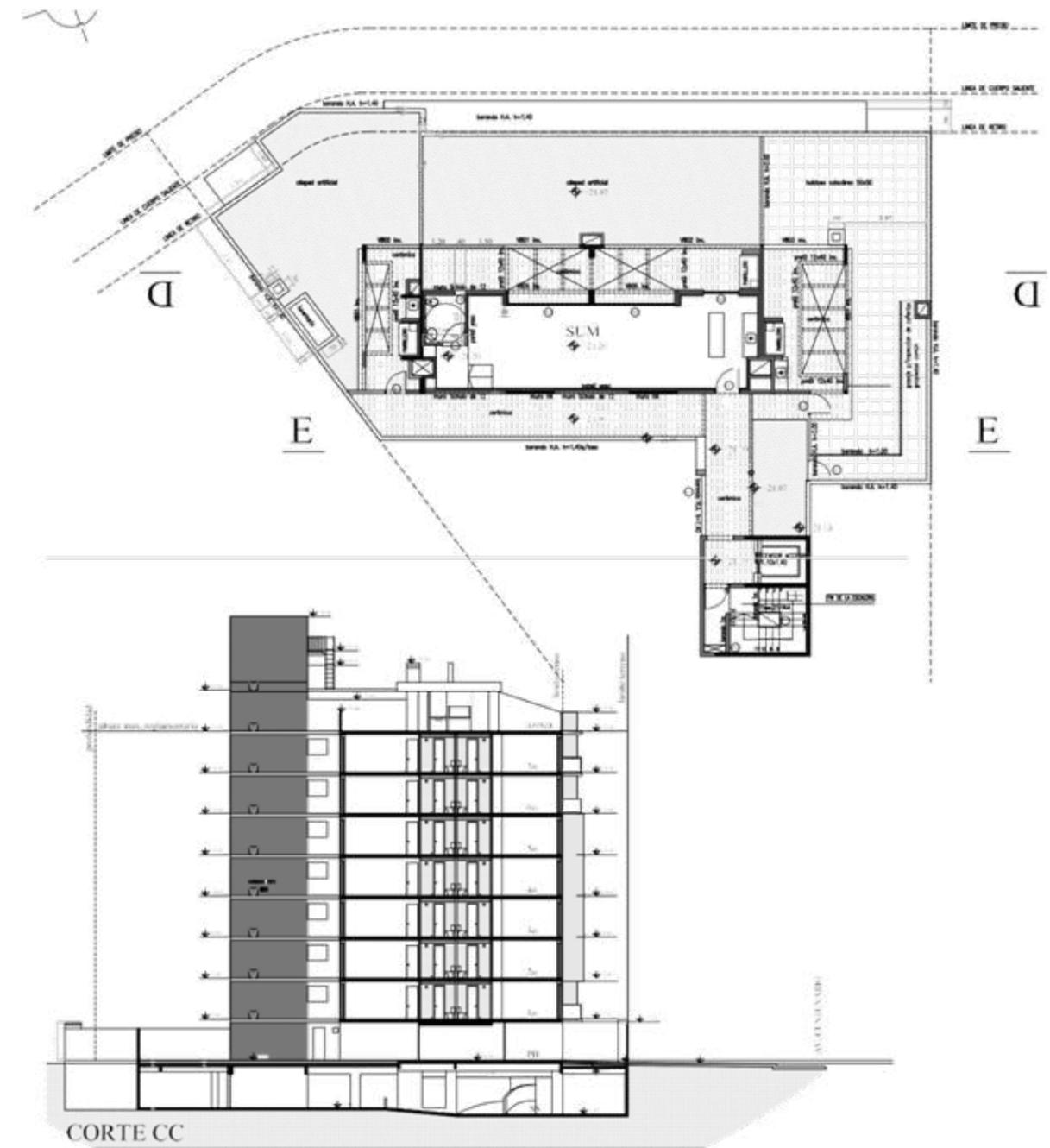
PLANTA TIPO Niveles 1 al 7





En Planta baja se ubican 2 unidades de 2 y 3 dormitorios, espacio de estacionamiento al aire libre y lugar de juegos infantiles, la

planta tipo plantea 4 unidades por nivel 3 de ellas de 2 dormitorios y 1 de 3 dormitorios, todas se encuentran conectadas por un pasillo



de acceso abierto que “balconea” al espacio común en Planta Baja.

El último nivel está destinado al Salón de usos múltiples (SUM) y a terrazas barbacoas privadas de las unidades del 7mo nivel.

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

El procedimiento constructivo que requiere el sistema Forsa, consiste en sucesivos llenados monolíticos de muros y losa en una misma instancia.

En el caso de esta obra se trabajó de modo tradicional (estructura de pilares y vigas) en los niveles de subsuelo y sectores de Planta Baja y en las plantas del primero al 7mo nivel se sectorizan en 5 etapas.

Recubrimientos (en cualquier cara):

- Cabezales: 5 cm
- Vigas de fundación: 5 cm
- Pilares en fundación: 5 cm
- Pilares: 3 cm

Encofrado

Se utilizarán encofrados de aluminio tipo Forsa.

Características de los materiales

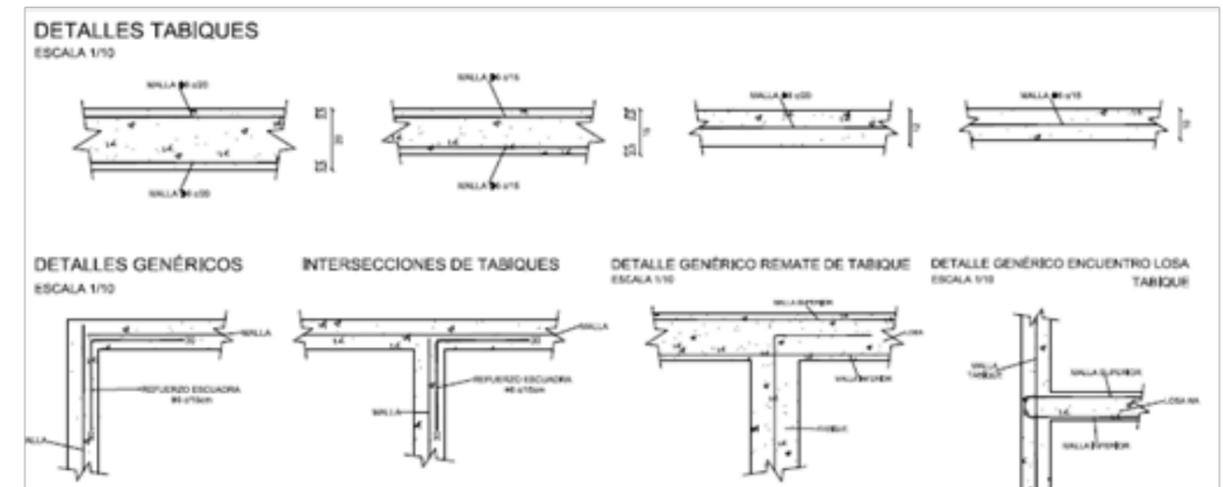
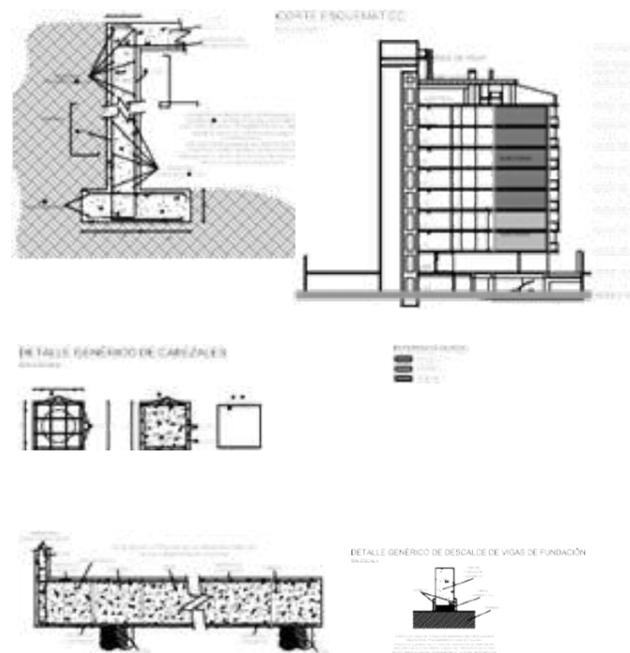
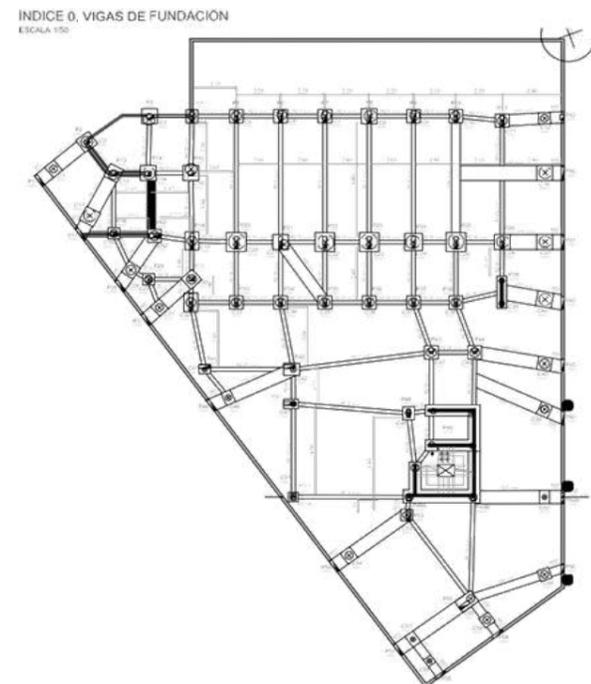
Hormigón estructural salvo indicación expresa en cada índice:
C25, 0 según UNIT 972.

Indicado ϕ
ADN 500 según UNIT 843

Indicado ϕ
Acero al 220 según UNIT 34

Malla electrosoldada:
Deberá cumplir con las especificaciones de la norma UNIT 845.

NOTA:
Se utilizará preferiblemente hormigón autocompactante para tabiques, pero nunca para losas, en el caso de utilizar hormigón normal para tabiques el mismo deberá tener consistencia blanda (ideal de 8 a 14 cm de asentamiento) y el tamaño máximo del árido no podrá superar los 20 mm.



El tipo de cimentación realizada fue mediante Pilotes con correspondientes cabezales de transición. La particularidad de estas obras es la alta carga por peso propio que soportan las plantas inferiores, debido a que la totalidad de los muros de los niveles superiores son de hormigón. Es por dicha razón que los elementos estructurales en subsuelo son de grandes dimensiones.

Etapas de llenado

Las 5 etapas en las que se fueron llenando cada nivel se dividieron de la siguiente forma:

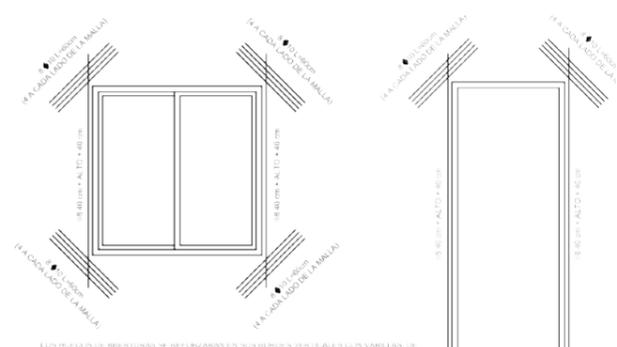
- Etapa 1: módulo de ascensor y escalera
- Etapa 2: muros y losa de unidad 01
- Etapa 3: muros y losa de unidad 02
- Etapa 4: muros y losa de unidad 03
- Etapa 5: muros y losa de unidad 04

Refuerzos constructivos en aberturas.

- Etapa 3: muros y losa de unidad 02
- Etapa 4: muros y losa de unidad 03
- Etapa 5: muros y losa de unidad 04

El tiempo transcurrido entre llenada de las distintas etapas fue 48 hs, cada dos días se realizó un llenado.

Existen ciertas consideraciones constructivas para este tipo e sistema, a continuación se detallan posición de armaduras en encuentros de muros entre si, y de muros con losa. A su vez debido a la gran rigidez del sistema se deben implementar refuerzos en algunos sectores de aberturas para evitar fisuración a 45° en las esquinas.





FM: Formaleta de muro.
Tamaño máximo : 60 cm.
de ancho con altura de 240
cm.

FL: Formaleta de losa
Tamaño máximo: 90 cm x
120 cm.

EQL: Unión Muro Losa
Conecta el panel y la losa.
Tienen diferentes alturas:
5, 10, 20 y 30 cm. y la
tipo cuchilla con 7 mm de
altura.

Otros tipos:
Caps-CP
Esquineros internos-EQM
Tapamuros para puertas y
ventanas:
TPV - TPH

Encofrados Forsa

Es un sistema de encofrados de aluminio livianos y fáciles de manipular que tienen origen en Colombia, y rápidamente se ha expandido a diversos países.

No define el sistema constructivo es únicamente un molde, en este caso se utiliza generando muros y losas completamente de hormigón armado. La aislación térmica e impermeabilización son aplicados posteriormente.



Fotografías tomadas en la obra.

TAREAS PREVIAS AL LLENADO:

En primera instancia se posiciona la doble malla de armadura electro soldada correspondiente a muros y esta se ata a las prolongaciones de la malla del nivel anterior y a los refuerzos a modo de pilar que se ubican dentro de los muros. Luego de posicionadas las armaduras, entra el subcontrato de eléctrica a ubicar cajas para tomacorrientes y canalizaciones. En el caso del subcontrato de

sanitaria, se dejan piezas de polisterieno expandido a modo de rebajes en el muro en los sectores destinados a posteriormente albergar las cañerías.

Una vez terminada la armadura y la ubicación de las instalaciones, se procede a colocar los moldes forsa y a fijarlos adecuadamente, de forma de evitar cualquier posible filtración en



el momento del llenado. Una vez montado los paneles correspondiente a muros, se encofra la losa y posteriormente se ubican las armaduras e instalación eléctrica.

MODO DE LLENADO

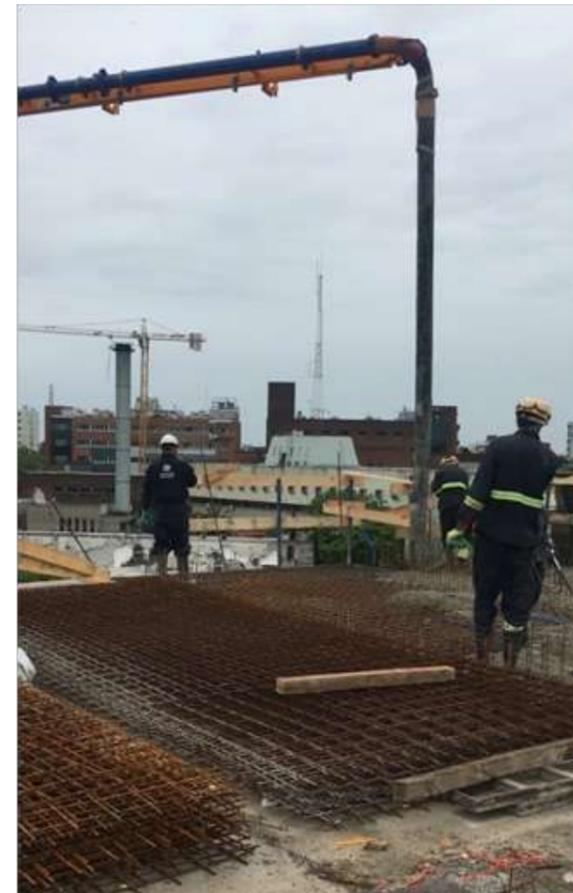
El llenado de la mayor parte de la obra se realizó mediante bomba lanza con la adición de diversos accesorios para llegar a los sitios mas lejanos.

La colocación del hormigón se realizó desde la parte superior del encofrado. La empresa cuenta que en versiones anteriores de los moldes forsa, existían piezas que ya tenían previstos puntos de llenado inferiores, pero nunca llegaron a adquirirlos por lo que el vertido del autocompactante siempre se realizó desde puntos superiores.

Como particularidad del llenado, la empresa comenta que en algunas ocasiones fue imprescindible la incorporación de vibrado en los muros, debido a que no se conseguía buena compactación. Por dicha razón hubo durante la obra un dialogo fluido con la empresa hormigonera para ir mejorando y adaptando la formula a los requisitos planteados.

Cada llenado constó de 2 etapas, en primera instancia se llenaban elementos verticales, muros, con autocompactante, y una vez finalizado se procedía a llenar la losa correspondiente al modulo con hormigón común.

Este procedimiento se repetía cada día y medio, llenando así todo un nivel completo en 2 semanas.



MATERIALES EMPLEADOS

En la obra se utilizaron 3 tipos de hormigones:

- En cimentación y estructura de pilares, vigas y losa de subsuelo, se utilizó hormigón convencional con una fck a los 28 días de 30 Mpa.
- En muros de los niveles Planta baja hasta Nivel 8: se utilizó hormigón autocompactante con resistencia característica a los 28 días de 25 Mpa.
- En losas de Planta Baja hasta Nivel 8: se utilizó hormigón convencional con resistencia característica a los 28 días de 25 Mpa.

- En las últimas etapas de llenado: caja de ascensor y escalera, y SUM, para facilitar la entrega del material debido a la poca cantidad de hormigón en caso de diferenciarse entre común y autocompactante, se utiliza para todas las piezas hormigón convencional con gravillón de igual resistencia.

La totalidad del hormigón de la obra, fue suministrado por la empresa Cielo Azul hormigones, solo una pequeña parte correspondiente a pretil perimetral de azotea fue hecho en obra utilizando la dosificación 3:2:1 con una relación a/c de 0.5.



Figura 1

ENSAYOS

Se realizaron 3 tipos de ensayos sobre el hormigón utilizado tanto fresco como endurecido:

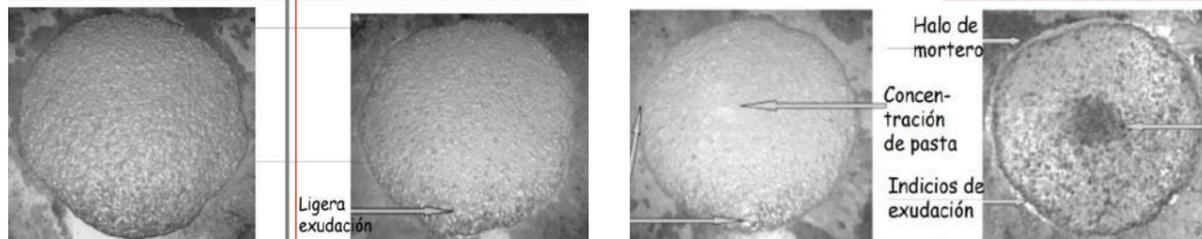
Tronco de cono

El ensayo para el que se suministraron fotografías tiene un diámetro de 68cm. El índice de estabilidad visual se asemeja a un tipo 1 no se observa segregación si una ligera exudación que se puede apreciar un halo perimetral. Ver figura 1. Durante todo el proceso de estructura se tomaron probetas cilíndricas de 15x30cm de los diferentes elementos estructurales, con su correspondiente

trazabilidad. Se realizaron ensayos a la compresión de varias de ellas, verificando las resistencias deseadas en algunos casos incluso a los 7 días de llenado. Ver tablas 1-2 donde se especifican ensayos tomados por parte de la empresa constructora y también por parte de la empresa hormigonera.

Y en última instancia, solamente en un sector, donde se observó un retraso de fraguado se realizaron pruebas con esclerómetro y posteriormente, se tomaron testigos, del hormigón endurecido que luego fueron ensayados a la compresión. Dichos estudios arrojaron como resultado que el hormigón cumplía con los requisitos exigidos a pesar del retraso en su fraguado. Ver figuras 2 y 3.

FM: Formaleta de muro.
Tamaño máximo : 60 cm. de ancho con altura de 240 cm.



Nº de Probeta*	Fecha fabr.*	Fecha ensayo	Edad (días)	Peso (kg)	Altura (cm)	Diám. (cm)	Densidad aparente (kg/m³)	Carga máxima (kN)	Resistencia a la compresión (MPa)
61	09/Abr	07/May	28	12,2	29,9	15,0	2298,7	575,8	32,4
65	10/Abr	07/May	27	12,2	29,9	15,0	2319,1	547,6	31,0
70	12/Abr	07/May	25	12,1	29,7	15,0	2319,6	483,9	27,5
75	16/Abr	07/May	21	12,3	29,7	15,0	2335,2	635,7	36,0
77	18/Abr	09/May	21	12,2	29,6	15,0	2353,1	569,9	32,4
80	19/Abr	10/May	21	12,2	29,4	15,0	2348,2	485,9	27,5
84	25/Abr	09/May	14	12,3	29,8	15,0	2344,0	512,4	29,0

* Datos suministrados por el interesado

Fecha Elaborada	Tipo Hormigón	Resultado a 7 días Mpa	Resultado a 7 días Mpa	Resultado a 28 días Mpa	Resultado a 28 días Mpa
06-jun	HAC30	31,1	30,9	38,5	40,2
07-jun	C30	30,6	32,7	38,9	39,9
12-jun	HAC30	25,3	25,9	33,2	31,3
15-jun	HAC30	26,5	25,7	35,0	36,0
15-jun	HAC30	30,7	31,5	42,2	42,8

Figura 2

Figura 3





Figura 4



Figura 5



Figura 6

DESENCOFRADO Y CURADO

El desencofrado de elementos verticales se realizó a las 24 hs del llenado. El uso del desencofrante fue fundamental para logra el correcto acabado de las superficies y proteger a los moldes de la adherencia del material.

El curado recomendado por el ingeniero calculista fue de 5 a 7 días

ACABADO FINAL DE HAC

La dosificación del HAC como se mencionó anteriormente dio algunos problemas de compactación en en los primeros llenados la cual fue modificandose a lo largo de la obra. Pero esta razón obligó a la incorporación del vibrado del hormigón. Esto generó burbujas de aire superficiales que se pueden apreciar en varios de los muros ver figura 3.



Figura 7



Figura 8

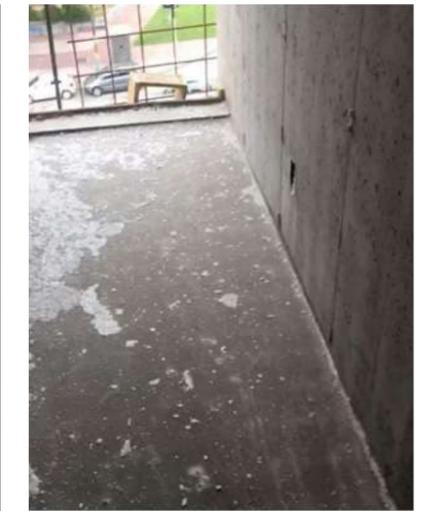


Figura 9

En algunos sectores de piezas ya desencofrada se pudo observar un acabado acabado poroso y en algunos casos la presencia del árido disgregado ver figura 4.

También se observaron algunos sectores con pequeñas fisuras horizontales entre juntas de paneles debido a posible retracción por secado ver figura 5.

Las razones anteriormente mencionadas ocasionaron la imposibilidad de utilizar este acabado como hormigón visto, optando por un acabado final en interiores de 3 manos de enduido y pintura látex.

En el exterior se aplicó en los caso de muros INT-EXT una capa de revoque termoaislante, basecoat y pintura texturada. En casos de muros unicamente exteriores, se aplico basecoat y pintura texturada.

OTROS HORMIGONES ESPECIALES

En esta obra también se aplicaron otros hormigones especiales:

- *Hormigón Celular*
En pendientes de azotea. Debido a la gran carga de la estructura por su peso propio se optó por

aligerar los rellenos en azotea con hormigón celular con un peso específico de 700kg/m3. Dicho hormigón fue hecho en obra por parte del subcontrato de la impermeabilización. Fue realizado a base de Cemento Portland Ancap de origen Minas debido a la compatibilidad con el aditivo espumante utilizado llamado Concrefom Cs, la dosificación del mismo no fueron suministradas por la empresa.

- *Mortero Autonivelante*
Fue utilizado para la realización de todos los contrapisos interiores, en el caso el material también suministrado por la empresa Cielo Azul y la colocación en obra fue hecha por subcontrato.

El procedimiento de colocación consiste en colocar elementos niveladores según el espesor de la capa exigido (en este caso 8cm) ver figura 7. Luego el material se aplica con una bomba de arrastre ver figura 8. Finalmente el tiempo de fraguado es de aproximadamente 48 hs para permitir el transito sobre él. Luego de endurecido se le realiza un pulido para retirar la película que se forma en la superficie ver figura 9.

Agradecimientos

- Empresa constructora Vinsocasur Suministro de informacion, datos técnicos y fotografías.
- Empresa Cielo Azul Hormigones.
- Empresa Cotexsa SA.

Bibliografía

- Sitio web oficial encofrados Fosa: www.forsa.com.co
- Límites establecidos para ensayo de cono de flujo según EFNARC 2002
- The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. EFNARC 2005
- Índice de estabilidad visual según ASTM C 1611/C 1611M-05
- Ensayos de probetas de hormigón según Norma UNIT 101:1998.

Hormigón autocompactante en sistema de encofrado metálico

Leandro Agustín Baptista Borgarelli¹

1. e-mail: arq.leandrobaptista@gmail.com



Palabras clave: Hormigón Autocompactante; Encofrados Metálicos; Controles en obra.

Resumen: El presente trabajo pretende dar una descripción general sobre la utilización de hormigones auto-compactante, desde su puesta en obra, hasta su curado; mediante el empleo de encofrados metálicos. Así como también, hacer mención a controles y prevenciones, inconvenientes surgidos en obra y recomendaciones.

Key words: Self-compact concrete; Metal Formworks; Controls on site.

Abstract: The present work pretends to give a general description about the use of self-compacting concretes, from its putting into the construction, until its curing; by using metal formworks. As well as mentioning controls and preventions, problems arising in the construction and recommendations.

CASO DE ESTUDIO: COOPERATIVA DE VIVIENDA DE AYUDA MUTUA
Cooperativa Covisunmra

Ubicación: Camino Carrasco y Pedro Cossio, Montevideo, Uruguay.
Año de construcción: setiembre 2017 – actualidad.
Régimen de construcción: Cooperativa de ayuda mutua.
Sistema construcción: Monolítico de hormigón armado, encofrado metálico.
Proyecto: 3 bloques, de 4 torres cada una; interconectadas por paliers. Totalizando 36 unidades con tipologías de 2 y 3 dormitorios + SUM.

1. Introducción

Antecedentes

Particularidades de la organización de obra

Mano de obra no calificada. Una obra de ayuda mutua es totalmente distinta de una obra privada “tradicional”, precisamente por las particularidades que le otorga la propia gente construyendo sus viviendas. En la mayoría de los casos sin experiencia previa en esa tarea.

La importancia de la ayuda mutua en el programa es que cuanto más se tenga y más calificada sea, menos necesidad habrá de contratar peones y personal especializado, pudiendo volcar esos recursos en mejorar la calidad del producto terminado.

Una de las claves del éxito de un programa de ayuda mutua es que esta pueda asumir todas las tareas no calificadas, de modo de contratar solamente personal en rubros especializados. De hecho, la obra no puede depender exclusivamente de la ayuda mutua, ya que el tiempo que dedica

Figura 1: Complemento de piezas caseras. Fuente: el autor.

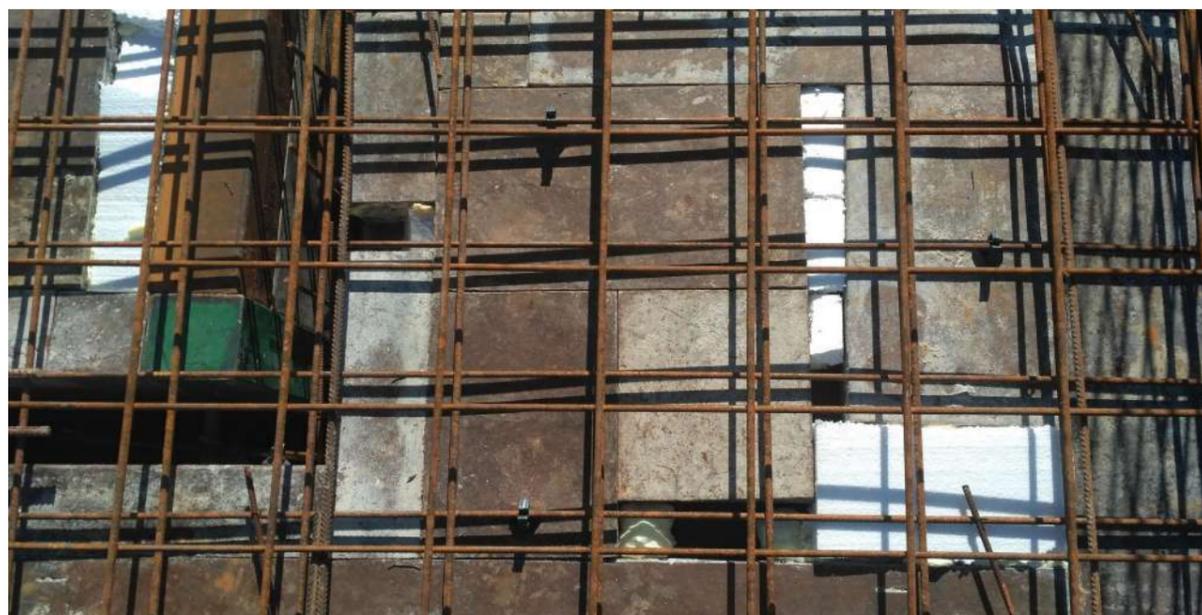


Figura 2: Piezas encofrado metálico [1].



ésta no permite sostener los ritmos necesarios para un desarrollo adecuado del trabajo.

Tareas complementarias de técnicos. Los diferentes técnicos, incluyendo Capataz juegan un rol fundamental ya que hacen docencia en su tarea, donde no solo indican que es lo que hay que hacer, sino que explican porque hay que hacerlo; despertando de esta manera interés en la gente sobre lo que es el procedimiento constructivo. Generando también dentro del grupo el interés en lo que es la participación y el trabajo colectivo.

2. Presentación del sistema de encofrado

¿Por qué se optó por un sistema de encofrado metálico?

Por ser un sistema constructivo ágil, versátil, dedicados a garantizar la máxima calidad en el servicio y el máximo ahorro en costes en el desarrollo de proyectos en el sector de la construcción.

Con el sistema de encofrados metálicos se logra industrializar todo el proceso de construcción y reducir los costes de materiales, desperdicio y mano de obra. Es decir, permiten la construcción de unidades de vivienda en serie, similar al sistema post-fordista.

En consecuencia, facilita el seguimiento de obra en términos de tiempo y costos.

El proceso de montaje de los paneles es de forma manual, pueden ser armados rápidamente y transportados por operarios/cooperativistas; o bien, pueden ser transportados mediante equipos elevadores.

2.1 Las ventajas más notables del uso de sistema de encofrado metálico son las siguientes:

- **Adaptabilidad:** se ajusta a cualquier forma arquitectónica.
- **Industrialización:** Con la estandarización constructiva se logra reducir costes, desperdicios y mano de obra.
- **Reutilización:** los módulos son diseñados para ser reutilizados.
- **Rapidez:** reduce los tiempos en la ejecución de la obra.
- **Calidad:** mejora la calidad en los acabados (lisos – textura).
- **Sencillez:** Facilidad en el montaje
- **Obra ecológica:** elimina los materiales dañinos para el medio ambiente.
- **Son económicos,** si el número de usos es grande, dado que tiene mayor resistencia y durabilidad en comparación con otros materiales.
- **Gran Capacidad de Carga.**
- **Terminación:** Al ser no absorbentes, se obtienen caras lisas, planas ideales para revestir y/o pintar.

2.2 Las posibles desventajas que se pueden presentar en los encofrados metálicos

- Ante un mal uso que reciba el encofrado metálico por parte del operario, son propensos a sufrir abolladuras, torceduras, deformaciones, los cuales llevan tiempo e incurrir en sobre costos de obra posiblemente no previstos.
- Los encofrados metálicos de muro requieren una enorme variedad de accesorios pequeños, que acaban perdiéndose en la obra y cuya instalación consume mucha mano de obra y prolijidad de trabajo.
- Se necesita protección para evitar la oxidación, lo cual representa un gasto adicional.
- Cuidadoso uso del desencofrante. El uso en exceso puede ser perjudicial, ya que al escurrir y caer sobre la base de apoyo crea una mayor junta fría y en consecuente gran facilidad a la permeabilidad al agua entre la unión losas-muros.

La utilización de un sistema constructivo con tipo de encofrados metálicos es única y se debe realizar un diseño de encofrado, hecho por los especialistas en el rubro.

Estos datos son entregados en planos de detalle para su armado y en el cual se ve el uso correcto de todos los elementos que se disponen para el correcto armado de los paneles.

Caso contrario, es usual incurrir en piezas de ajustes caseras, las cuales no garantizan la efectividad del sistema constructivo.

Para el presente caso de estudio, se utiliza el sistema de encofrado metálico *METALEX*.

A diferencia de otros sistemas metálicos permite el armado del encofrado mediante piezas más pequeñas. El peso máximo de la pieza mayor (60x120) es de 25 kilos.

La ventaja radica en adaptabilidad ante cualquier modificación de proyecto que pueda surgir en obra.

Además, la utilización de la 2° fila de encofrado para armado de andamios perimetrales exteriores, sin la necesidad de su remoción.

Como desventaja, presenta dificultad para el sellado de paneles, permitiendo la pérdida de pasta de cemento.

Figura 3: Montaje instalaciones en mallas de acero. Fuente: el autor.



Figura 4: Desencofrado. Fuente: el autor.



3 Síntesis de las etapas de Estructuras de Hormigón Armado

3.1 Limpieza y Nivelación de terreno. Confección de armado y llenado vigas cimentación.

3.2 Montaje hierro e instalaciones

Consiste en colocar todo las mallas de hierro en muros, así como todas las instalaciones eléctricas y pases de sanitaria intra-muros.

3.3 Armado de moldes

Muros: Armado completo de la vivienda, aplomado, nivelación, dándoles la verticalidad y horizontalidad requerida.

Losas: Colocación encofrado metálico de losas e instalación de hierros.

3.4 Hormigonado

Una vez armada la vivienda, se procede al llenado con hormigón fresco traído de planta industrial. Para muros se emplea hormigón autocompactante C25, para losas C25 común. De esta manera se llenan muros y losas simultáneamente, generando así una estructura monolítica.

Figura 5: Proceso de montaje. Fuente: Manual encofrado metálico Metalex. <https://www.metalex.com.co>



3.5 Desencofrado y Curado

Acondicionamiento de moldes para su uso. Limpieza en general previo y post llenado. Aplicación de desencofrante, armado de andamios y estructuras auxiliares.

4. Hormigón

4.1 Tipos de hormigones utilizados en obra

¿Por qué se optó por un hormigón autocompactante?

Debido a una esbeltez de muros de 10 cm de espesor y 250 cm de altura por nivel, con un alto contenido de armadura establecido por proyecto de estructura. A su vez, durante el llenado que no se permita el bloqueo del árido grueso y no haya segregación ni exudación del hormigón.

Se busca obtener un hormigón con buena compacidad, impermeabilidad, durabilidad y trabajabilidad. Además, los requisitos de proyecto demandaban una terminación lo más lisa posible con el fin de aplicar únicamente pintura.

Según la EHE-08, un hormigón autocompactante es aquel hormigón que, como consecuencia de una

Figura 6: Proceso de montaje. Fuente: el autor.



dosificación estudiada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación, no presentando segregación, bloqueo de árido grueso, sangrado, ni exudación de la lechada. [2]

4.2 Resistencia característica del hormigón

Para todos los elementos se utilizará hormigón tipo C-25,0 según Norma UNIT 972-97, de 25 MPa de resistencia característica a la rotura a los 28 días en cilindros normalizados. [3]

4.3 Control de Resistencia del hormigón

El objeto es comprobar que la resistencia del hormigón colocado en obra es por lo menos igual a la especificada en el párrafo anterior.

Se extraen 3 muestras (probetas) cada 50 m3 vertidos.

4.4 Consistencia

El hormigón autocompactante se caracteriza por una elevada fluidez hasta el punto de que los

métodos tradicionales de ensayo como por ejemplo el cono de Abrams quedan obsoletos.

En este tipo de hormigones determinamos la consistencia mediante el ensayo Cono de flujo o explayamiento, según EN 12350- 2: “Ensayos de hormigón fresco” en el que se cuantifica la fluidez de la masa midiendo la “torta” circular que forma cuando se deja fluir libremente.

Como se visualiza en Tabla 1, el explayamiento adecuado para este proyecto es de 60cm +- 5cm, con un T50 entre 3 a 7 segundos.

4.5 Tamaño máximo de árido

La separación de las armaduras es el factor principal para definir el tamaño máximo de árido limitado a 20 mm. Además, al disminuir el tamaño del árido grueso permite obtener menor área de zona de transición y conseguir hormigones con mayores resistencias.

Se debe exigir a plantas suministradoras de hormigón un mayor control respecto al árido solicitado, por ejemplo a través del uso del tamiz GTM para asegurarnos la granulometría adecuada.

Tabla 1. Clases de HAC en European Guidelines for Self Compacting Concrete. [4]

Clase	Escurecimiento	Aplicaciones
SF1	550-650 mm	Losas de viviendas, túneles, pilotes y fundaciones.
SF2	660-750 mm	Muros, columnas
SF3	760-850 mm	Estructuras densamente armadas

Clase	T50	Tv	Aplicaciones
VS1/VF1	< 2s	< 8s	Estructuras muy armadas, con requisitos de terminación o riesgos de exudación o segregación.
VS2/VF2	> 2s	9-25 s	Cuando se requiera mejorar la resistencia a la segregación.



Figura 7: Tamaño de árido superior al especificado. Fuente: el autor.

4.6 Dosificación Empleada por Planta Suministradora

Pedregullo 5 a 12- 0,5m3
 Arena Gruesa- 0,27m3
 Arena Fina- 0,36m3
 Aditivo Sikament 290N – 0.9% de cantidad de cemento
 Aditivo Sika Viscocrete 6 -0,8% de cantidad de cemento
 Aditivo Sika pump – 0,5% de cantidad de cemento
 Cemento- 400 kg.

4.7 Mezcla de los componentes

La mezcla de los componentes es realizada en planta dosificadora.

4.8 Transporte

El transporte se realiza mediante camiones de hormigón pre-mezclado. Es importante que la hormigonera esté en buenas condiciones mecánicas y que se asegure una carga máxima en el entorno del 75% de su capacidad, por ocasional vuelco del

Figura 8: Ensayo cono de flujo. VSI=0. Fuente: el autor.



material hacía la vía pública durante su transporte a obra. Los camiones llegan a obra precintados, con el fin de verificar con el remito las características del hormigón solicitadas y dar ciertas “garantías” de control de calidad del producto desde su salida de planta. Tener en cuenta el tiempo de transporte máximo desde la salida de planta, el tiempo de espera y el tiempo de aplicación sin dejar de lado las ocasionales temperaturas elevadas. En ningún caso se añadirá agua al hormigón.

4.9 Colocación del hormigón - Puesta en obra

El hormigón autocompactante debe ser bombeado ya que se puede producir disgregación al utilizar cubas debido a la caída en altura.

Previo a su colocación se procede a estudiar el Índice de Estabilidad Visual (VIS), según norma ASTM C 1611/C para asegurarnos que no hayan principalmente indicios de segregación ni exudación. [6] [9]

Ningún hormigón es colocado antes que todos los trabajos de encofrado, preparación de superficies, instalaciones, colocación de piezas especiales y armaduras hayan sido debidamente aprobados por la jefatura y dirección de obras. Por requisitos de proyecto, se prohíbe expresamente el hormigonado con temperaturas menores a 5°C y mayores a 40 °C, ni cuando se prevean temperaturas menores a los 0 °C.

El hormigón deberá ser colocado lo más cerca posible de su posición final, sin segregación de sus componentes y deberá cubrir todos los ángulos y partes irregulares de los encofrados, alrededor de las armaduras y piezas especiales.

Es muy importante prestar especial atención en la fijación y sellado del encofrado ya que debido a la presión hidrostática ejercida por el hormigón autocompactante en el encofrado pueden ocurrir fugas de pasta de cemento por medio de juntas del encofrado.

Figura 9: Pérdida pasta de cemento. Fuente: el autor.



Figura 10: Consecuencia por pérdida de pasta al desencofrar. Fuente: el autor.

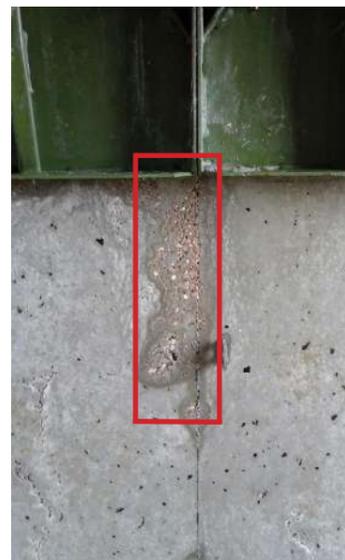


Figura 11: Separación bordes de encofrado por manipuleo inadecuado. Fuente: el autor.



Figura 12: Separador plástico de muros en junta de moldeo. Fuente: el autor.

Figura 13: Sellado base de encofrado. Fuente: el autor.

4.10 Compactación.

Pese a la ausencia de uso de vibradores en hormigones autocompactantes, posee la capacidad de atravesar una gran densidad de armaduras y canalizaciones eléctricas, consiguiendo un acabado superficial liso, sin segregación por ausencia de éste. En consecuencia, se consigue un

considerable ahorro de mano de obra, en el tiempo de ejecución, y reducción de ruidos molestos.

Se utiliza vibrador únicamente en hormigón común de losas (hormigón común), verificando el correcto uso de los mismos: introducción vertical en el hormigón, no desplazamiento horizontal del mismo, separación de los puntos de vibrado no

Figura 14: Curado con láminas plásticas y arpilleras. Fuente: el autor.



Figura 15: Curado con láminas plásticas y arpilleras. Fuente: el autor.



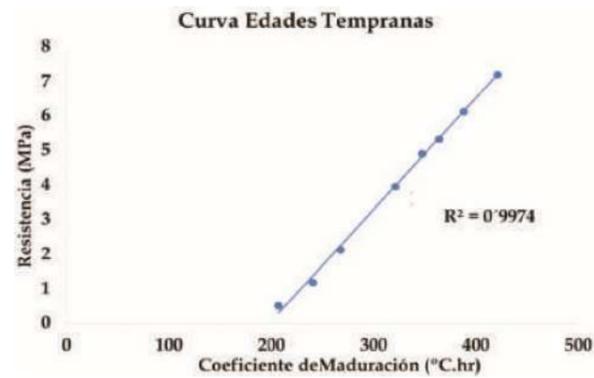


Gráfico 1.- Relación Resistencia-Maduración.

mayor de 60 cm, y no vibrar más de 90 segundos en cada punto.

4.11 Protección y curado del hormigón

Inmediatamente después de su colocación, el hormigón es protegido de la acción del viento y del sol mediante regado continuo (ininterrumpido) o cubriendo el hormigón con arpillera humedecida o films de polietileno. El curado se prolonga como mínimo hasta que el hormigón adquiera el 70% de la resistencia de

proyecto. Los procedimientos detallados del curado se describen en el Artículo 71.6 de la EHE-08 [8]. El curado es importante en todos los hormigones pero lo es más aún en los elementos hechos con hormigones autocompactantes, debido a su alta cantidad de cemento por m³ en relación al hormigón común. Esto permite conseguir aumento de resistencia a tempranas edades y obtener un buen acabado superficial, disminuyendo así la probabilidad de riesgo de fisuración superficial y formación de grietas debido a la evaporación del agua.

Figura 16



Figura 17

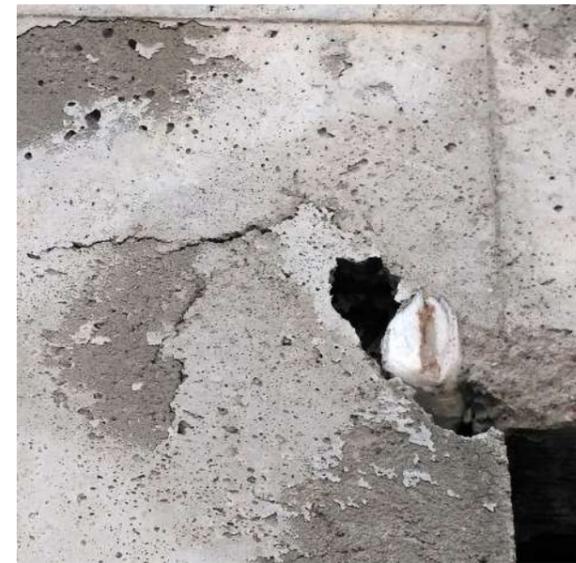


Figura 18



Figura 19



Figura 20

4.12 Desencofrado.

Para facilitar la tarea de desencofrado se emplean productos antiadherentes (desencofrantes) aplicados directamente sobre el molde metálico, previo a verter el hormigón.

Además, permiten obtener una alta calidad de acabados.

4.13 ¿Cuándo desencofrar?

Según encuesta realizada por S. Teixeira; A. Santilli; I. Puente [5]; a 70 directores de obra en Uruguay, con el fin de estudiar qué valor creían que era suficiente para desencofrar elementos verticales, resultando que aproximadamente 3 de cada 4 directores de obras consideran suficiente un valor de resistencia de 5 MPa, es decir el 20% del fck, con un coeficiente de Resistencia-Maduración de 352,5 °C.hr según Gráfico 1.

5. Identificación de problemas en obra

En este punto buscamos exponer los principales factores de riesgo negativo al implementar esta tecnología en un emprendimiento de cooperativas de vivienda.

Respecto a la *calidad de terminación* de los trabajos ejecutados; por ejemplo, en piezas de encofrado las cuáles no se le aplicaron desencofrante de manera adecuada, o tareas de limpieza del encofrado deficientes, ocasionan pérdidas de la calidad del producto terminado de hormigón (figura 16).

La *falta de control del mantenimiento de los equipos* de encofrados ha dado como resultado que a medida que los equipos se usan sin realizar un mantenimiento, el acabado de los muros y losas empeora.

La *falta de colocación de separadores* de hierro en muros, especialmente en lugares de gran concentración de armaduras o canalizaciones obliga a desencofrar dicho sector, ocasionando así retrocesos de obra y pérdida de eficiencia (figuras 17 y 20).

Al efectuarse *llenado desde la parte superior* y en diferentes puntos, se corre riesgo de oclusión de aire en la masa de hormigón, especialmente en antepechos de vanos. Una forma de aminorar la posibilidad de ocurrencia, es mediante golpeo



Figura 21

frecuente de martillos de goma en los nervios del encofrado metálico (figuras 17 y 20).

Retiro de paneles metálicos: Los paneles son retirados manualmente y en varias ocasiones son golpeados con el martillo para facilitar el desencofrado. El desgaste de los paneles perjudica el acabo del hormigón debido a la variación geométrica del encofrado.

Apilamiento de encofrados: Los paneles de encofrado son apilados sin cuidado, sin un lugar específico y en consecuencia se dañan y/o ensucian por consecuencia de otra actividad. El desgaste de los

Figura 24 - Retiro de testigos en muro. Fuente: el autor.



Figura 22



Figura 23

paneles perjudica el acabado de muros debido a la variación geométrica del mismo.

Inadecuada dosificación en hormigón: Posteriormente al llenado de una unidad, nos encontramos con la dificultad de desencofrar muros al día siguiente, dado que el hormigón no había fraguado completamente aún. Se desgranaba con cierta facilidad al frotarlo.

Posiblemente, a causa del empleo adicional de superplastificante, lo cual ocasionó desprendimiento superficial de hormigón (figura



21), diferencias en tonalidad, color y texturas (figuras 22 y 23).

Así como también, retrocesos de obra y costos adicionales a la empresa contratista debido a que no se pudo reutilizar dichos encofrados por un lapso prolongado de tiempo.

Dada la duda de la resistencia de los muros, se procedió a la obtención de testigos a 28 días, ensayados según norma UNIT-NM 69:1998. Posterior a los resultados de ensayo, a criterio del ing. calculista del proyecto, no fue necesario realizar refuerzo estructural.

Sin embargo, dado su bajo valor, se procedió a tomar medidas de recubrimiento para no condicionar la durabilidad.

6. Mantenimiento de Muros HAC

No se requiere mantenimiento diferente al de hormigón común. Sin embargo, en fachadas al exterior se aplican membranas

Bibliografía Consultada

- [1]Manual encofrado metálico Metalex. <https://www.metalex.com.co>
- [2]Manual HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE BASF, Versión 5.1, Año Julio 2009.
- [3]Memoria Estructura, proyecto Covisunmra. Ing. Pablo Otero.
- [4] Zerbino et al. Reología de hormigones autocompactables (pág 8/14).EPG 2005, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification Production and Use. <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMav2005.pdf>
- [5] S. Teixeira; A. Santilli; I. Puente. Optimización del tiempo de desencofrado en piezas verticales de

líquidas impermeabilizantes, confiriéndole así características hidrófugas. [7]

7. Consideraciones Finales

En este trabajo se ha descrito las características del tipo de hormigón autocompactante utilizado en obra y su aplicación puntual en encofrados metálicos, así como también una síntesis del proceso constructivo. Dicho sistema se encuentra en auge, especialmente en sistemas de cooperativa, buscando aminorar costos y ganar en celeridad, se busca ser más eficiente. Como técnicos actuantes en obra debemos conocer las ventajas de empleo de dicho material y su compatibilidad con el sistema de encofrado a utilizar, así como también sus limitaciones y posibles inconvenientes que puedan surgir durante el transcurso de obra.

8. Agradecimientos

A la empresa Relanes Construcciones por brindarme la posibilidad de trabajar en obra.

Hormigón Autocompactante. Facultad de Ingeniería, Universidad de Montevideo, Montevideo, Uruguay. ISSN 2301- 1092 - ISSN (en línea) 2301-1106.

- [6] Ing. Maestro, M. Burón; Ing. Fernández Gómez, J.; Ing. Garrido, L. HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE - CRITERIOS PARA SU UTILIZACIÓN. Abril 2006 / N° 887.
- [7] PIEL DE HORMIGON. Aspectos técnicos y estéticos del HAC pág. (25/148) <http://www.hormigonespecial.com/publicaciones.html>
- [8] SIKA. Manual del Hormigón según Norma EHE-08. FT-661/JUNIO 2010/GRÁFICAS COUCHÉ, S.L.
- [9] SIKA. Excelencia en Tecnología de Concreto Autocompactante. Septiembre de 2008.
- [10] CEMEX. Hormigones de alta trabajabilidad. <https://www.cemex.es/productos-y-soluciones/hormigon/>

Hormigón compactado por rodillo

Marcelo Giacri¹

1. e-mail: marcelogiacri@gmail.com



Obra: Explanada de Contenedores de la terminal Cuenca del Plata

Datos:

Ubicación: Puerto Montevideo

Año: 2012

Material: HCR (hormigón compactado a rodillo)

1. Introducción

Definición

Hormigón compactado por rodillo es aquel hormigón seco y rígido con bajo contenido de pasta que requiere gran energía de compactación para su consolidación.

Generalidades

Se usa para lugares que se someten a cargas excesivas de peso.

No utiliza dispositivo de transferencia de carga (armaduras, pasadores), ni encofrados al contener mayor cantidad de agregados que pasta.

Desarrolla rápidamente altas resistencia mecánicas y permite alta durabilidad.

Presenta buen comportamiento a la fatiga, una alta resistencia a la abrasión y capacidad de soportar altas temperatura de superficie.

Por su bajo contenido de pasta (200l/m³) presenta baja susceptibilidad a las fisuras por contracciones de secado. Presentando distancias de fisuras de contracción de hasta 1,5 - 2 veces mayores que las del hormigón común.

Mayor facilidad de colocación en especial para grandes volúmenes y la necesidad de un menor número hora - hombre, permiten que las obras duren hasta un 50% menos.

Descripción

La obra consiste en la sustitución del pavimento existente el cual ya presentaba patologías de daño problemáticas para el funcionamiento actual del puerto, por uno nuevo que mejore las características originales y se adecue a las exigencias actuales.

El pavimento existente es de adoquines de hormigón de 10 cm, asentados en una capa de arena cuyo espesor es 3 cm. También cuenta con una base granular cementada de espesor 20 cm que presenta una resistencia de 2 Mpa a los 7 días, y una sub base granular de CBR > 60% de 60 cm de espesor.

Se propone el cambio por un pavimento que presenta las siguientes características, HCR de resistencia a la flexión de 4,0 Mpa de un espesor igual a los 35 cm, el cual será tendido en 2 capas simultaneas. Presentando la base y sub base las mismas características del pavimento a sustituir.

Dosificación

La dosificación se realizó de acuerdo a lo que se establece en la Tabla 1.

Equipamiento

La mezcla se realizo en una planta móvil de hormigón del tipo Pugmill, para garantizar la

	CP	Piedra	Finos	HCR
% m ³ Aridos		49%	51%	
% m ³ HCR	14,30%	42%	43.7%	100%
Peso m ³ Aridos	330 kg	970 kg	1010 kg	2310 kg

Tabla 1 - Dosificación

mínima distancia de transporte de la mezcla. Se transportaron a la obra en camiones de caja volcadora de 16 m³ mínimo.

Para el tendido se uso una terminadora de concreto asfáltico equipados con equipamiento de alta compactación (90%-95%).

La densidad final se alcanza con pasadas de rodillos de tandem vibratorio de 10 t y para una buena terminación y garantizar un buen sellado se pasó un rodillo neumático enseguida.

El Curado se realizo utilizando un camión regador de 5000 l de manera inmediata al tendido y luego de la compactación mediante mochilas atomizadoras se aplica una membrana química en ambos sentidos para garantizar una adecuada cobertura de la superficie

Procedimiento Constructivo

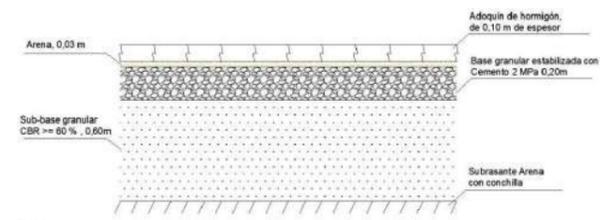
Se procede al retiro de los adoquines y se realiza una evaluación de la base granular cementada y la sub base mediante el uso DCP (dynamic cono penetrometer). Se analizan los resultados.

En aquellos puntos que los resultados obtenidos se consideran que no cumplen con las características fijadas se sustituye y compacta con lo solicitado. Se construye el nuevo pavimento HCR según especificaciones técnicas del PCA (Portland Cement Association).

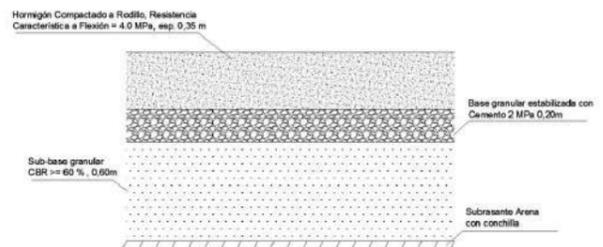
Diseño del espesor HCR

Para determinar el espesor del HCR se uso un software desarrollado por la PCA para diseños de pavimentos HCR - RCC Pave.

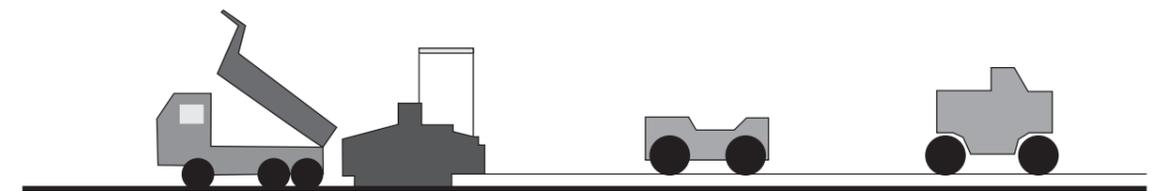
Pavimento existente



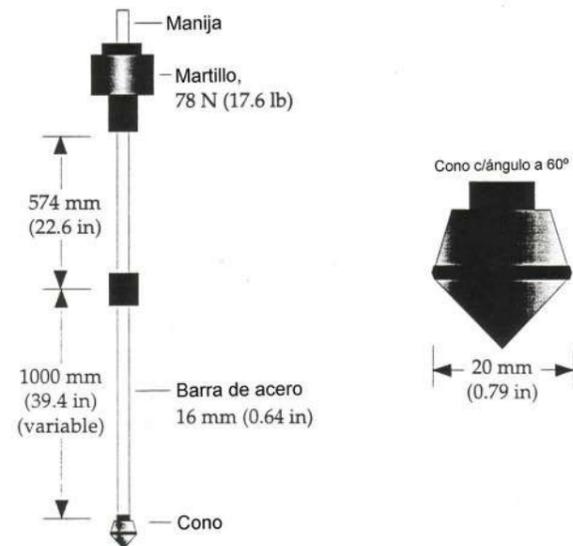
Pavimento nuevo



Esquema de tendido



Camión volcador Terminadora Rodillo tandem vibratorio Rodillo Neumático



Imágenes DCP



Ingresan los siguientes parámetros:

- Periodo de diseño de 20 años.
- Repeticiones de carga plena de 1:000.000 veces.
- Vehículo usado para el diseño Straddle Carrier DES4 de 1200 kn de carga plena y 8 ruedas simples.
- Características especificadas de la base y sub base adoptados.
- HCR con modulo de royura 4,0 Mpa.
- Modulo de reacción de fundación igual a 4,0.
- Se realiza dos corrimientos del programa . Uno ubicando la carga en el interior de la losa y otra ubicando la carga en el borde de la losa.

Obteniendo los siguientes resultados:

- Carga Interior = 34 cm.
- Carga de Borde = 43.5 cm.

Adoptando el siguiente criterio:

- Carga Interior = 35 cm.
- Carga de Borde = 45 cm

Materiales empleados
(ver tabla 1)

Cementos

Pudiendo emplearse cementos comunes es aconsejable el empleo de cementos puzolánicos (las que nos permiten una mayor trabajabilidad, mayor impermeabilidad y mayor resistencia final, pero como consecuencia negativa nos genera retracción plástica) o de escoria granulada de alto horno, de manera de lograr un tiempo de comienzo de fragüe mayor, lo que asegura un “tiempo de trabajo” para el HCR mayor que el que se obtiene cuando se emplea cemento normal.

Este concepto de “tiempo de trabajo” es importante en la tecnología de los HCR y se define como el tiempo transcurrido desde el comienzo de la producción en hormigonera o en mezcladora, cuando se incorpora el agua al hormigón, hasta el comienzo del fraguado del cemento, en el cual debe realizarse totalmente el transporte, la puesta en obra y la compactación hasta su terminación. Debe conocerse entonces el tiempo de comienzo de fragüe del cemento que se va a emplear, y en base a este dato y la planificación del trabajo a ejecutar se

determinará la conveniencia o no de agregar aditivo del tipo retardador de fraguado.

Agregado grueso y fino

Puede emplearse canto rodado natural o piedra triturada. Las canteras de la zona deben poder proveer piedra fina de trituración de roca (comúnmente llamada “Binder”, “arena de trituración”, “fracción fina”, etc.), muy limpia, y su parte “fina” (aquellas partículas de tamaño menor a los 74 micrones) no deben ser arcillosas o coloidales, porque restan muchísima resistencia final, al interactuar con el cemento. Esto se dice, simplemente porque las arenas de trituración en todas las canteras, pueden contener una parte de finos arcillosos, ya que las normas que rigen su utilización en los pavimentos asfálticos lo permiten. El tamaño máximo es importante por los problemas de segregación y de terminación superficial, aconsejándose el uso de Tamaño máximo = 20 mm. Las arenas pueden ser de tipo industrial o natural según las condiciones locales.

La experiencia europea, que fue adoptada en nuestro país con excelentes resultados, indica dos tipos de granulometrías, donde también se incluye la presencia del cemento, ver tabla 3.

El porcentaje en que intervendrá el agregado grueso y el fino se determina por los métodos comunes de composición granulométrica, partiendo de las curvas tipo indicadas, según el tamaño máximo elegido, y haciendo intervenir al cemento como un agregado más, partiendo de una composición de entre el 12 % y el 14 % de cemento sobre el peso total de la mezcla. La cantidad de cemento suele estar comprendida entre 250 y 330 kg/m³. En general debe tenderse a adoptar las curvas menos ricas en finos, con objeto de evitar el riesgo de “colchoneo” durante el proceso de compactación de la mezcla.

En la obra se utiliza de agregado grueso granito triturado de la cantera de Montevideo 5 mm / 20 mm, con un desgaste de los Ángeles menor al 25%. De agregado fino se utiliza una mezcla 2:1 del polvo de la trituración del granito de la cantera

de Montevideo de 0 mm / 5mm y arena gruesa natural de 0,5mm / 6mm.

Agua

El porcentaje óptimo de agua oscila entre el 4 y el 6 % del peso seco de los materiales, con lo cual la relación agua – cemento queda comprendida entre 0,33 y 0,38. En nuestra tecnología el porcentaje óptimo se determina partiendo del ensayo Proctor, con probetas preparadas con distintos porcentajes de humedad, entre el 3 y el 7 %, compactadas de acuerdo al Ensayo VN – E 5-67 (Ensayo V), lo que permite determinar la Humedad óptima y la Densidad máxima del material; este último valor oscila en las experiencias entre 2,2 y 2,4 g/cm³. El HCRV es muy sensible a las variaciones del contenido de agua, la falta aumenta el riesgo de segregación y el exceso dificulta el aprovechamiento total de la energía de compactación.

Aditivos

Se tratará generalmente de evitar su uso, únicamente puede resultar interesante el empleo de retardadores de fraguado, en cuyo caso la incorporación debe realizarse junto con el agua en su ingreso a la hormigonera o mezcladora. En la obra se usaron retardadores de fraguado aquellos días que la temperatura fue mayor o igual a los 25°C al 0,33% del peso del cemento Portland

Compactación

La compactación inicial se logra por medio de los pisones dobles en las terminadoras logrando valores mayores del 90% de la densidad objetivo.

Luego se realizan 4 pasadas del rodillo de tándem vibratorio, 1 estático y el resto vibrando. Tan solo cuando se realiza la segunda capa inmediatamente después de la pasada del rodillo de tándem vibratorio se realizan 2 pasadas de rodillo neumático para una terminación de aspecto sellado.

Se realiza un control de densidad con un densímetro nuclear del tipo Seaman c200

Tamiz IRAM	Pasa acumulado	
	16 mm	20 mm
25,4	--	100
19 mm	100	85-100
16 mm	88-100	76-95
9,5 mm	70-87	60-83
4,8 mm	51-69	42-63
2 mm	34-49	29-47
420 µm	18-29	16-27
74 µm	10-20	9-19

Tabla 3 - Materiales empleados

Diseño de mezcla HCR

Se realizan 4 proctor modificados con contenidos de cp (cemento portland) 11%,12%, 13%,14%. Se moldean 48 probetas, 12 con cada contenido de cemento y de esos 12 se moldean 4 con HO -1%, 4 con HO y 4 con HO + 0,5%, para poder determinar la sensibilidad de la resistencia al cambio de humedad. Todas las probetas se moldean con el número de golpes necesario para lograr 98% del PUSM.

De esas 4 probetas se ensayan 2 a compresión a los 7 días y 28 días respectivamente y los otro dos se ensayan con tracción indirecta por compresión diametral también a los 7 días y a los 28 días. Todas las probetas están curada en cámara Húmeda para mantener constante la humedad h = 100% y temperatura 21°C

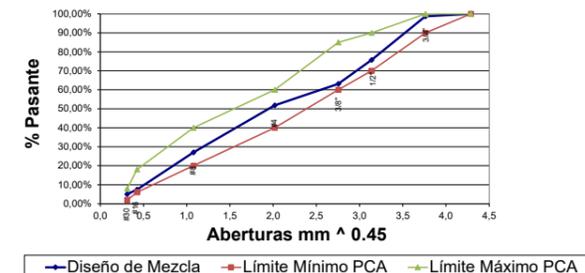
Ensayos Proctor

Los ensayos determinan que la cantidad necesaria de CP es del 13% unos 300 kg/m³ y una resistencia requerida a la tracción mínima de 3,5 Mpa. Pero en la práctica es necesario subir la cantidad de CP al observar una merma entre los testigos y las probetas curadas en laboratorio se determina necesario CP 14,3% unos 330 kg/m³

Plan de Pavimentación

Como la plataforma debe mantener activa su operativa la misma se realiza en etapas. Para el tendido se utilizaron 2 terminadoras que trabajan escalonadamente. Una para la capa inferior y la otra terminadora para la capa superior. Con una longitud máxima de tendido de 72,5 m y un ancho que varía entre los 4,5 m y los 5 m.

Figura - Granulometría de la mezcla de agregados



La compactación de los bordes (0,30 m) de cada senda se difiere hasta que se extiende la senda contigua para que la compactación de la junta longitudinal ocurra conjuntamente

Curado

Se realiza un curado inicial, hasta complementar la jornada de tendido y compactación realizando sucesivos riegos de agua presurizada por medio del camión regador para garantizar la superficie húmeda ininterrumpida.

Antes de realizar la capa superior se realiza un riego total. En la junta vertical expuesta y lugares de difícil acceso para el camión regador se usaron mochilas atomizadoras cargadas de agua.

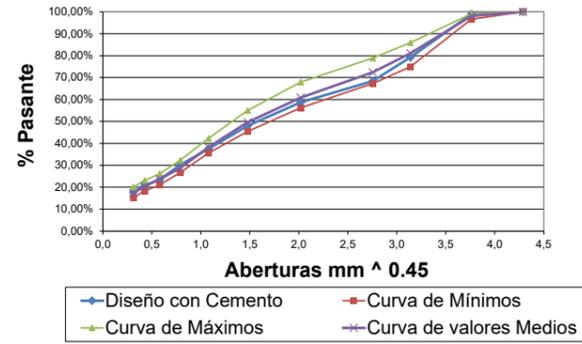
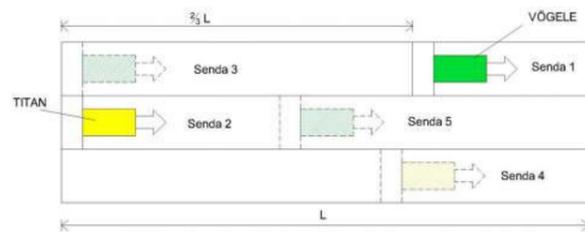
Luego de terminada la compactación de los rodillos se realiza el curado final con membrana química del tipo Antisol de base acuosa realizando 2 pasadas vertiendo 0,3l/m², una en sentido longitudinal y la otra pasada en sentido transversal.

Aserrado de Juntas

Se efectúan entre las primeras 7hs - 24hs luego de compactado el hormigón a una profundidad de entre 1/4 y 1/3 del espesor de la losa.

La junta fría se realiza aserrando 0,10m del borde longitudinal y cortando el resto con martillo perforador para asegurar la superficie rugosa.

Mezcla	Gravilla en Kg/m3	Polvo en Kg/m3	Arena Gruesa en Kg/m3	Cem. Port. en Kg/m3	PUSSMAX	COH	PUSH	Agua en litros/m3	Relación a/c	
Cont C.P.	49%	34%	17%	Var.						Gravilla 5-20mm de Cantera Montevideo
11%	994	690	345	251	2.28	5.6%	2.408	128	0.51	Polvo 0-5mm de Cantera Montevideo
12%	979	679	340	272	2.27	5.3%	2.390	120	0.44	
13%	976	677	339	298	2.29	5.3%	2.411	121	0.41	
14%	961	667	333	319	2.28	5.5%	2.405	125	0.39	Arena Natural Gruesa



La verde realiza siempre la pavimentación de las

Figura - Control de Obra de la Granulometría de la Mezcla con Cemento

Control de Calidad

Se sacan testigos de probeta y se ensayan a los 7 días y a los 28 días a compresión (C) y a tracción indirecta de compresión diametral (TICD)

Se obtienen valores medios de los testigos de TICD de 3,5 Mpa y C de 28,8 Mpa

Se realiza como prueba de nivel de adherencia el ensayo de resistencia al corte de la unión entre capas, obteniendo como resultado una resistencia media igual a 1,8 Mpa.

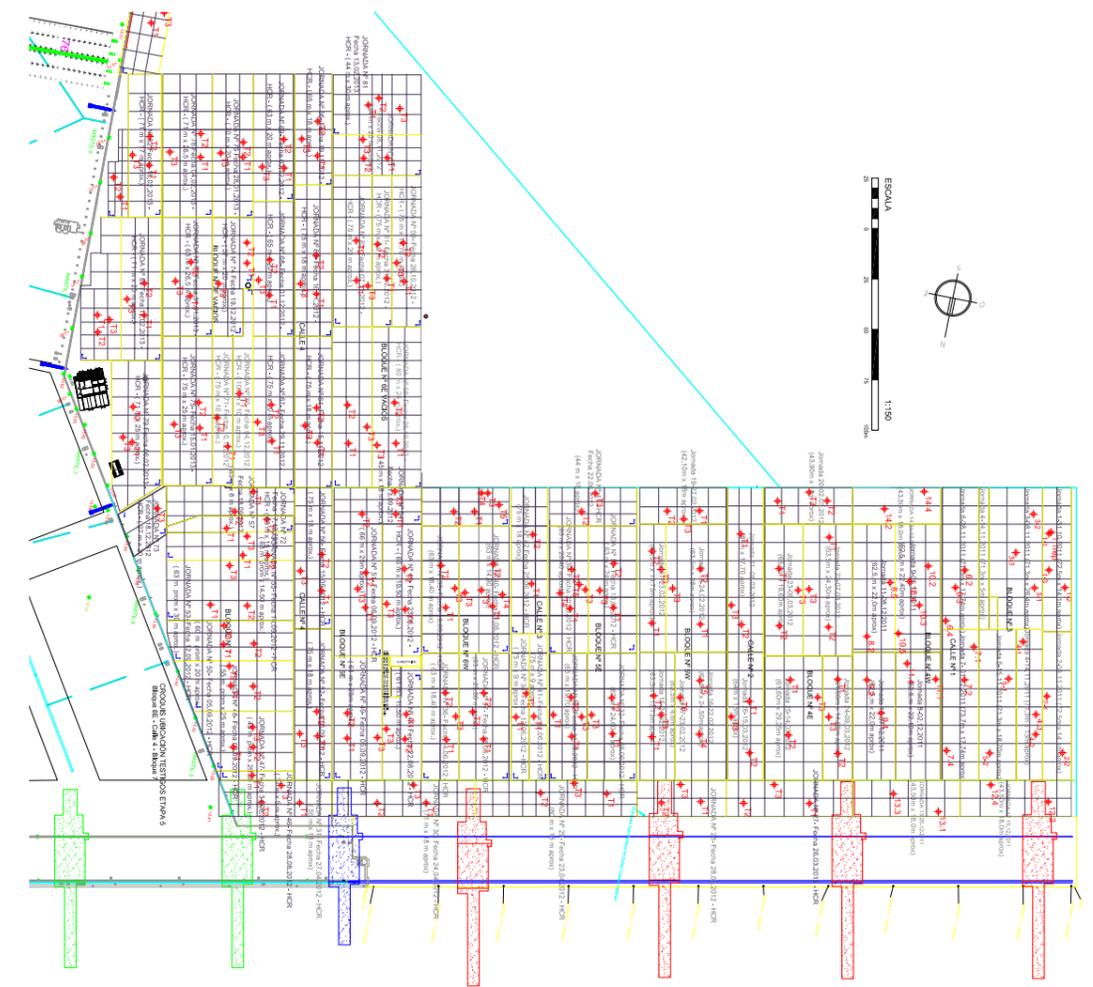
Y los controles granulométrico dentro de los márgenes de tolerancia.



Testigo	Diám. Testigo (mm)	Peso molde sup + varilla (Kg)	Carga ensayo (Kg)	Carga TOTAL (Kg)	Área al corte (cm2)	Valor cortante (Kg/cm2)	Valor cortante (MPa)
6-4	72	3,63	806	810	40,7	19,9	1,9
6-3	72	3,63	642	646	40,7	15,9	1,6
6-1	72	3,63	744	748	40,7	18,4	1,8
6-2	72	3,63	816	820	40,7	20,1	2,0
6-4	72	3,63	1366	1370	40,7	33,6	3,3
6-3	72	3,63	938	942	40,7	23,1	2,3
6-1	72	3,63	1346	1350	40,7	33,1	3,2
6-2	72	3,63	979	983	40,7	24,1	2,4
6-4	72	3,63	1795	1799	40,7	44,2	4,3
6-3	72	3,63	1560	1564	40,7	38,4	3,8
6-1	72	3,63	846	850	40,7	20,9	2,0
6-2	72	3,63	1366	1370	40,7	33,6	3,3

Figura - Ensayo de adherencia

Figura - Planta de Ubicación de extracción de testigos



HORMIGÓN COMPACTADO A RODILLO : Obra "Repavimentación explanada nueva area CSBS y area Saceem" (101 y 109)

Resumen de Resistencia de Probetas Moldeadas en Laboratorio y Testigos extraídos

Valores en Mpa
Densidades de probetas entre 97% y 99% del PUSM
Nota: Las humedades se estimaron sumando un 1% a las lecturas del densímetro (esto fue verificado en laboratorio)

Jornada	Fecha	% CP sobre Mezcla Seca	Edad (días)	Compactación				Probetas			Testigos			
				Capa #1	Capa #2	Capa #1	Capa #2	Tracción Indirecta por Compresión Diametral		Compresión Convencional 15x30	Densidad Sat. a Sup. Seca	TICD	Compresión	Esp. Prom.
								Molde Chico	Molde Grande					
1	31/10/2011	14.2%	7	98.0%	100.0%	6.4%	6.4%	4.2	3.8	27.6	2.45	3.5	25.4	36.0
2	04/11/2011	15.3%	7	98.0%	99.0%	6.2%	6.6%	3.8	4.0	26.0	2.44	3.1	25.7	35.0
3	08/11/2011	15.7%	7	99.0%	99.5%	6.2%	6.6%	4.4	4.2	31.9	2.41	4.1	28.5	35.7
4	14/11/2011	13.1%	7	99.0%	99.0%	6.5%	6.4%	4.7	3.7	29.1	2.41	4.1	28.5	35.7
5	15/11/2011	13.4%	7	99.0%	99.0%	6.4%	6.7%	4.7	4.1	38.7	2.44	3.7	26.7	33.5
6	28/11/2011	13.5%	7	98.6%	98.8%	6.3%	6.2%	5.4	4.5	37.3	2.43	3.8	25.3	34.0
7	01/12/2011	14.6%	7	99.2%	99.0%	5.9%	5.9%	4.0	3.5	28.4	2.37	3.2	28.5	37.2
8	02/12/2011	14.9%	7	99.0%	99.1%	6.1%	5.9%	5.6	4.1	32.3	2.35	3.2	23.0	35.6
9	05/12/2011	15.9%	7	99.0%	99.2%	6.0%	6.2%	4.1	3.4	25.0	2.39	3.8	25.9	34.6
10	07/12/2011	13.1%	7	98.3%	99.2%	5.5%	5.4%	4.4	4.0	30.7	2.37	3.2	28.5	37.2
11	08/12/2011	13.9%	7	98.8%	98.8%	5.4%	5.3%	4.9	4.3	38.2	2.37	2.7	25.4	35.4
12	19/12/2011	14.6%	7	98.9%	98.1%	5.4%	5.3%	3.7	3.3	18.6	2.35	2.6	35.7	35.7
13	20/12/2011	15.3%	7	99.5%	98.7%	5.6%	5.8%	4.4	3.8	28.5	2.38	3.5	37.7	37.7
14	21/12/2011	14.1%	7	99.4%	98.8%	5.5%	5.6%	4.1	3.6	36.2	2.34	2.6	33.9	33.9
15	21/02/2012	15.4%	7	100.4%	100.0%	6.3%	6.0%	4.4	3.8	26.7	2.41	3.5	36.0	35.7
16	22/02/2012	14.9%	7	99.4%	100.2%	5.5%	5.7%	4.0	4.0	31.6	2.38	3.1	26.4	37.9
17	23/02/2012	14.4%	7	99.0%	99.0%	6.4%	6.4%	3.6	3.3	31.3	2.40	3.6	26.0	35.5
18	24/02/2012	13.9%	7	100.0%	100.3%	6.4%	6.3%	4.5	3.8	35.0	2.43	3.0	27.4	35.8
19	27/02/2012	13.8%	7	100.6%	100.6%	5.8%	5.8%	3.9	3.3	30.7	2.38	3.5	25.0	37.6
20	02/03/2012	13.4%	7	99.8%	100.0%	6.2%	6.6%	4.1	3.7	37.6	2.42	3.4	23.8	34.9
21	05/03/2012	14.3%	7	100.0%	99.9%	6.1%	6.2%	3.8	3.3	31.6	2.41	3.5	30.4	33.7
22	07/03/2012	14.6%	7	99.0%	99.6%	6.1%	5.9%	4.1	3.5	34.5	2.37	3.5	26.7	32.1
23	08/03/2012	15.0%	7	99.1%	100.1%	5.5%	5.6%	3.5	3.2	35.1	2.37	3.2	29.2	34.0
24	09/03/2012	14.8%	7	98.6%	99.2%	5.6%	5.4%	4.1	3.6	39.6	2.37	3.2	29.2	34.0
25	14/03/2012	15.0%	7	100.0%	99.6%	5.7%	5.7%	3.6	3.3	32.7	2.34	3.2	29.3	34.9
26	15/03/2012	14.8%	7	99.9%	100.1%	5.8%	6.2%	3.1	2.7	31.9	2.40	3.4	29.3	36.4
27	26/03/2012	14.8%	7	100.4%	99.5%	5.6%	5.9%	4.0	3.8	33.7	2.37	3.4	33.4	33.5
28	28/03/2012	13.6%	7	99.9%	99.1%	5.9%	6.0%	3.9	3.8	31.8	2.40	3.7	30.9	34.9
29	23/04/2012	13.9%	7	100.4%	99.6%	6.2%	6.3%	4.0	4.0	39.5	2.40	3.4	25.5	35.1
30	24/04/2012	14.3%	7	100.7%	99.8%	6.2%	6.2%	4.1	3.9	36.0	2.40	3.4	29.3	36.4
31	27/04/2012	14.2%	7	101.0%	99.8%	6.2%	6.2%	4.0	4.6	38.2	2.40	3.4	29.3	36.4
32	08/06/2012	13.9%	7	99.4%	99.1%	6.2%	6.4%	4.1	3.8	33.7	2.37	3.4	33.4	33.5
33	11/06/2012	13.6%	7	99.0%	99.9%	6.4%	6.7%	4.9	4.0	35.7	2.37	3.4	33.4	33.5
34	12/06/2012	13.6%	7	100.5%	99.4%	5.8%	5.5%	3.9	4.0	31.3	2.40	3.6	29.4	35.9
35	13/06/2012	13.5%	7	99.5%	99.3%	6.2%	6.4%	4.0	3.8	29.7	2.39	3.3	31.6	34.5
36	14/06/2012	13.9%	7	98.5%	99.0%	5.1%	5.3%	4.3	4.4	34.7	2.38	3.4	27.1	34.9
37	18/06/2012	14.4%	7	99.5%	99.6%	6.0%	6.0%	3.8	3.6	25.7	2.36	3.4	27.1	34.9
38	19/06/2012	15.5%	7	99.3%	99.4%	6.3%	5.7%	4.1	4.1	29.5	2.36	3.4	27.1	34.9
39	20/06/2012	14.2%	7	99.5%	101.2%	5.3%	5.7%	4.1	4.1	29.5	2.36	3.4	27.1	34.9
40	21/06/2012	14.7%	7	99.8%	99.8%	5.9%	6.0%	4.3	4.3	34.1	2.38	3.4	26.0	36.9
41	22/06/2012	14.4%	7	100.5%	100.4%	5.8%	6.0%	4.2	3.8	30.2	2.39	3.6	25.5	35.3
42	25/06/2012	14.1%	7	99.9%	99.0%	6.2%	6.2%	4.0	3.8	29.7	2.38	4.0	29.5	36.5
43	26/06/2012	14.6%	7	100.5%	99.4%	4.8%	5.3%	4.1	4.2	32.7	2.36	3.8	14.9	35.0
44	22/08/2012	13.4%	7	100.4%	100.7%	6.4%	5.9%	3.8	3.7	32.3	2.40	3.7	27.9	35.5
45	23/08/2012	13.6%	7	100.8%	100.5%	6.0%	6.0%	4.8	4.5	37.8	2.40	3.55	27.7	35.8
46	28/08/2012	13.3%	7	100.0%	100.8%	5.5%	5.5%	3.7	4.0	29.3	2.42	n/c	34.6	34.5

3.8 3.4 23.2 A 3 días
3.8 3.1 25.7 A 2 días
3.6 2.7 19.4 A 3 días

3.7 3.0 17.5 A 3 días

REPETICION TESTIGOS

TICD	Compresión
3.14	25.91
3.84	

2.78	26.05
------	-------

47	31/08/2012	14.3%	7	101.0%	100.5%	6.3%	6.4%	3.9	4.0	28.8	2.41	3.3	28.0	35.7
48	03/09/2012	14.3%	7	100.7%	100.9%	5.9%	6.1%	4.4	3.5	35.4	2.41	3.6	26.5	34.5
49	04/09/2012	14.2%	7	100.4%	100.8%	6.1%	6.2%	4.1	4.1	32.1	2.41	3.8	30.8	33.3
50	05/09/2012	15.2%	7	100.5%	101.1%	5.6%	5.7%	4.8	4.3	39.3	2.40	3.1	23.5	33.2
51	06/09/2012	14.8%	7	99.7%	100.3%	5.8%	5.6%	4.4	4.1	36.2	2.41	3.3	30.1	34.7
52	10/09/2012	14.8%	7	100.4%	99.7%	6.2%	6.4%	4.6	5.1	39.9	2.39	4.0	23.8	33.8
53	12/09/2012	14.0%	7	100.4%	100.2%	5.8%	5.6%	3.5	3.4	31.2	2.40	3.5	30.8	34.7
54	13/09/2012	14.3%	7	100.7%	100.9%	5.8%	6.1%	4.1	4.2	32.8	2.41	3.8	31.6	36.3
55	14/09/2012	14.3%	7	100.8%	100.3%	6.1%	6.3%	4.7	4.2	36.5	2.42	3.8	28.2	34.7
56	15/09/2012	14.1%	7	100.6%	99.9%	6.0%	6.0%	4.4	4.2	36.4	2.41	4.0	28.2	34.4
57	18/09/2012	14.0%	7	100.6%	s/m	5.9%	s/m	4.8	4.6	39.2	2.40	3.8	26.2	35.2
58	25/10/2012	13.2%	7	100.4%	100.2%	6.5%	6.1%	4.3	4.3	27.5	2.42	4.0	28.6	36.5
59	26/10/2012	15.1%	7	100.6%	100.3%	5.4%	5.6%	4.6	4.5	32.1	2.39	3.7	30.0	35.5
60	27/10/2012	13.9%	7	99.9%	100.3%	5.8%	5.6%	4.4	4.3	40.5	2.39	3.3	30.0	34.6
61	31/10/2012	14.6%	7	100.3%	99.6%	5.2%	5.6%	4.0	4.1	28.5	2.38	4.0	30.8	35.0
62	07/11/2012	14.5%	7	99.3%	99.6%	5.0%	5.3%	4.3	4.2	34.0	2.38	4.0	29.7	34.5
63	08/11/2012	14.3%	7	100.1%	100.1%	5.6%	5.9%	4.0	4.1	33.0	2.40	4.1	36.1	33.5
64	15/11/2012	14.3%	7	100.2%	100.0%	6.2%	6.0%	4.5	4.4	33.9	2.40	3.5	35.9	34.8
65	16/11/2012	14.8%	7	100.1%	99.8%	5.2%	4.9%	4.2	4.0	27.5	2.40	3.7	30.4	35.3
66	19/11/2012	13.7%	7	100.5%	99.5%	5.1%	5.1%	5.0	4.8	35.2	2.40	3.2	32.8	33.3
67	29/11/2012	14.6%	7	100.2%	101.2%	5.8%	5.9%	4.0	4.3	32.8	2.43	3.6	31.3	32.9
68	01/12/2012	15.2%	7	99.8%	99.8%	5.8%	5.6%	4.1	4.0	29.7	2.39	3.5	31.2	33.5
69	03/12/2012	14.1%	7	100.5%	100.0%	6.0%	6.0%	4.4	4.9	32.0	2.41	3.7	30.8	34.3
70	04/12/2012	14.1%	7	100.2%	100.1%	4.9%	5.0%	5.2	4.3	34.9	2.42	n/c	28.3	32.6
71	10/12/2012	14.9%	7	99.6%	100.1%	5.9%	6.0%	4.4	4.3	31.7	2.41	3.8	30.2	33.8
72	17/12/2012	13.9%	7	99.6%	99.2%	6.5%	6.3%	4.7	4.7	35.7	2.40	3.7	30.1	36.0
73	18/12/2012	13.9%	7	99.2%	99.6%	6.5%	6.5%	5.0	4.9	34.9	2.40	n/c	33.7	37.0
74	19/12/2012	13.6%	7	100.6%	99.1%	6.4%	6.3%	4.7	4.7	35.7	2.42	4.1	32.2	35.6
75	15/01/2013	14.0%	7	99.5%	100.1%	5.8%	5.8%	5.0	4.6	41.4	2.39	3.4	31.5	36.7
76	28/01/2013	14.1%	7	99.2%	100.0%	5.6%	6.1%	3.9	3.9	28.8	2.38	3.5	26.3	33.4
77	31/01/2013	15.2%	7	99.9%	99.7%	5.9%	6.0%	4.5	4.5	32.7	2.39	3.9	28.7	34.1
78	04/02/2013	15.2%	7	100.3%	99.8%	6.0%	5.8%	4.2	4.2	29.5	2.40	3.4	30.1	31.2
79	06/02/2013	14.3%	7	99.9%	99.6%	5.8%	5.8%	4.6	4.6	31.5	2.38	3.8	26.4	35.1
80	12/02/2013	14.7%	7	99.8%	99.9%	6.1%	6.0%	4.4	4.9	34.1	2.41	4.0	28.5	34.5
81	13/02/2013	14.8%	7	99.8%	99.7%	5.9%	5.9%	4.6	4.6	30.3	2.41	3.7	26.7	32.9
82	18/02/2013	16.8%	7	100.2%	99.2%	6.0%	6.3%	5.2	5.2	37.6	2.40	3.7	27.2	35.3
83	27/02/2013	15.3%	7	100.5%	100.0%	5.8%	5.7%	4.0						



Conclusión

La elevada resistencia que se obtiene y el bajo costo constructivo por el uso de menor personal y rapidez con respecto al tendido tradicional del hormigón permite que el mismo sea muy conveniente para uso de puertos y complejos industriales.

La evolución de la técnica y equipos han permitido eliminar los desprendimientos que se producían en las juntas longitudinales y permiten lograr mejores niveles de regularidad superficial.

Presentan un bajo costo inicial, de hasta un 25% menos que la misma tarea para un hormigón convencional con las mismas características.

Bajo costo de mantenimiento

Gran rapidez de tendido hasta un 50% más rápido que el tendido del hormigón común. Gran durabilidad, se piensa en una vida útil mayor a los 30 años

Agradecimientos

Ing. María Inés Regusci

CVC - Construcciones Viales y Civiles S.A

Bibliografía

- Presentación “Hormigón Compactado por rodillo HCR” by Daniela Lecunda, www.prezi.org
- Trabajo - Hormigón Compactado por rodillo en uso Vial- by Alonso M., Bangerter M., Biagini J., Cavacini M.
- Conferencia “Aplicación HCR construyendo pavimentos” by H. García Terra, 5 ta. jornada de hormigón de Uruguay.
- Catalogo CCR de texemet - www.texemet.com.co
- ASTM internacional - CCR/ Co945_spend13- www.astm.org
- Boletín Junio 2004 de la Asociación Cemento Portland de Norteamérica (PCA).



El gran Arco de la Défense: ¿Un desafío?

Gabriel Pérez Miñón¹

1. e-mail: pe.gabriel@gmail.com

Resumen: El presente trabajo de revisión bibliográfica tiene como propósito interpretar el edificio del Arco de la Défense situado en la comuna homónima de Paris desde una clave simbólica, arquitectónica y tecnológica.

El trabajo ha sido dividido en cinco partes. En la primera se analiza la concepción del edificio, los ideales que busca transmitir y su carga simbólica. En la segunda se consideran los desafíos que implicó la construcción de un edificio de tales características hacia finales de la década del 80 y las estrategias que lo hicieron posible. A continuación, se indaga con una visión más tecnológica acerca de los materiales empleados como un punto destacado de las estrategias enunciadas anteriormente, se nombran los vidrios, los revestimientos de mármol de las fachadas, pero fundamentalmente se enfatiza en el material más innovador con que cuenta el edificio: el hormigón de alto desempeño con adición de sílice activa; se analizan sus componentes, su dosificación, sus propiedades y las razones por las que fue empleado en este proyecto. En la cuarta parte, previo a las consideraciones finales, se evalúa el desempeño de los materiales a casi 30 años de su puesta en servicio.

Palabras clave: innovación, estructuras arquitectónicas, hormigón de alto desempeño, tecnología.

Abstract: The purpose of this bibliographical review work is to interpret the Arco de la Défense building located in the homonymous commune of Paris from a symbolic, architectural and technological point of view.

The work has been divided into five parts. The first one analyzes the conception of the building, the ideals it seeks to transmit and its symbolic essence. The second one accounts the challenges involved in the construction of such a building towards the end of the 1980s and the strategies that made it possible. Then, it is investigated from a more technological vision about the materials used as a prominent point of the strategies mentioned above, glass and marble cladding of the façades are named, but fundamentally it is emphasized in the most innovative material available in the building: high performance concrete with the addition of silica fume; its components, dosage, properties and the reasons for been used in this project are analyzed. In the fourth part, prior to the final considerations, the performance of the materials is evaluated almost 30 years after its commissioning.

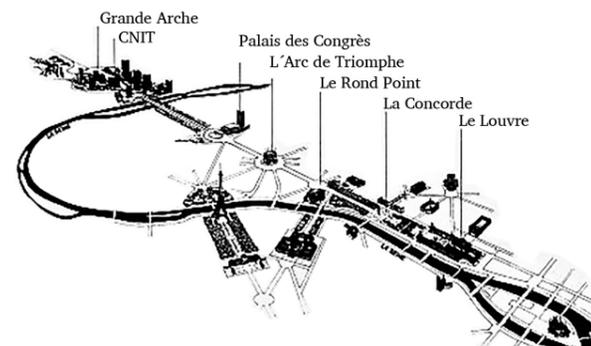
Key words: innovation, architectural structures, high performance concrete, technology.

1. Introducción

Dos presidentes de Francia habían tenido como proyecto marcar el eje histórico de París con una obra arquitectónica monumental: Georges Pompidou (con un proyecto de Ieoh Ming Pei, otro proyecto de Émile Aillaud y sobre todo la Tour Lumière Cybernétique de Nicolas Schöffer), y Valéry Giscard d'Estaing (con un proyecto de Jean Willerval). Sin embargo, fue finalmente el presidente François Mitterrand quien materializó esta idea, bajo el nombre de Projet Tête Défense. [1]

En el año 1982, 400 proyectos procedentes de más de 40 países se presentaron al concurso de un centro internacional de comunicaciones en la Défense como parte del plan "Grandes obras de París", en el distrito financiero, situado en el borde noroeste de la ciudad. [2]

Después de que el presidente François Mitterrand hiciera la elección final, basándose en los proyectos presentados y de acuerdo con el organizador del concurso Robert Lion, se abrió el sobre y Johan Otto von Spreckelsen, un arquitecto danés, desconocido hasta entonces, resultó ganador. Así es como nació una de las obras más monumentales del siglo pasado; un cubo de hormigón de 110 metros en cruz abierto por el centro y revestido (originalmente) en mármol blanco de Carrara y cristal con más de 150.000 metros cuadrados de oficinas en su interior. [2]



El gran Arco fue inaugurado el 14 de julio de 1989 en el año del bicentenario de la Revolución Francesa y con motivo de la cumbre del G7, inicialmente se llamó "El gran Arco de la Fraternidad". Este edificio cargado de simbolismo definido por su diseñador como una ventana de Francia hacia el mundo se sitúa en una parte icónica e histórica de París. [3]

Otto Von Spreckelsen ideó este arco monumental de hormigón, acero y vidrio con la idea de prolongar el eje histórico de ocho kilómetros que tras nacer en el Museo del Louvre, continúa por el famoso Jardín des Tuileries, el Obelisco, la Avenida de los Campos Elíseos, y el Arco de Triunfo, para culminar en La Défense con su explanada peatonal conocida como "Le Parvis". (Figura 1). El arquitecto diseñó el proyecto ganador para que fuese una versión adaptada al siglo XX del Arco del Triunfo, un monumento a la humanidad y a los ideales humanitarios, más que a las victorias militares. [4]

Para responder a las exigencias técnicas, Spreckelsen se asoció al ingeniero-diseñador danés Erik Reitzel, que se dio cuenta de que para instalar los cimientos del arco había que respetar la autopista y las líneas ferroviarias presentes en el subsuelo. Spreckelsen tuvo entonces la idea de colocar el cubo no alineado exactamente con el eje histórico (Figura 2), sino formando un

Figura 1 - Esquema del gran eje histórico este-oeste.

Fuente: elaboración propia según Architectures Capitales. Paris 1979-1989. P. 17 – Control de calidad: propiedades típicas.

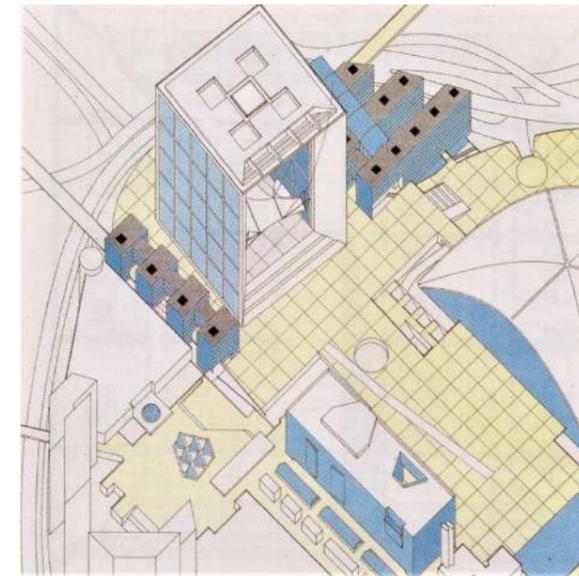


Figura 3 - Vista general exterior. Fuente: <https://cochehibrido.edufast.me/comment-se-rendre-au-parvis-de-la-defense-en-voiture/>

Figura 2 - Perspectiva del arco de la Défense mostrando la inclinación respecto al eje. Fuente: revista A&V monografías N°17 "Paris, Francia" p.43

ángulo de 6,30° con él, dando así profundidad al monumento. [1]

La relación entre Spreckelsen y sus clientes fueron difíciles. El reglamento del concurso indicaba que si el vencedor no era francés debía de ser ayudado por un equipo técnico nacional, por lo tanto, el arquitecto danés decidió, en enero de 1984, decidió confiar la responsabilidad de la construcción al arquitecto Paul Andreu. [5]

Las obras fueron llevadas a cabo por la empresa francesa de obras públicas Bouygues, comenzaron en 1985, y en ellas trabajaron dos mil personas. [5]

En abril de 1986, el nuevo gobierno de Jacques Chirac cuestionó el carácter público del edificio y suprimió el "Carrefour International de la Communication" (Centro Internacional de la Comunicación). Spreckelsen, molesto por la desnaturalización de su proyecto, dimitió. [6]

2. El desafío de la materialización

Este edificio-monumento tiene 110 metros de altura por 110 metros de ancho por 112 metros de profundidad y podría albergar la catedral de Notre-Dame dentro de su arco. [7]

La empresa de ingeniería civil francesa Bouygues fue la encomendada para materializar este marco de hormigón pretensado cubierto con vidrio en los lados sur y norte que albergan oficinas. (Figura 3) [5]

La construcción del Arco de La Défense supuso uno de los mayores desafíos encontrados para la realización de un edificio. Las principales dificultades estuvieron relacionadas con el diseño de la estructura, la elección de los métodos de construcción, la selección de los materiales y la dificultad para cumplir los plazos. [8] [9]

Los directores de obras, frente a tal desafío, querían realizar un trabajo de calidad y precisión, en palabras del director general de la constructora Bouygues, "El Arco de La Défense es a la vez un edificio que alberga oficinas, salas de exposición... y un monumento cuyos cimientos, estructuras y luces plantearon dificultades técnicas dignas de una gran obra". [5]

El gran Arco está construido como un puente elevado a 110 metros en el aire y sostenido por 12 pilares. Tiene vistas a la plaza de la Defensa y a los distritos circundantes de la ciudad de París. Se

necesitaron 300.000 toneladas de materiales para construir el monumento (equivalente a 30 veces el peso de la Torre Eiffel). [1]

En cuanto a los retos, la mayor dificultad era concebir y diseñar los medios de producción y de transporte a la obra de los 150 000 m³ de hormigón necesarios. Por esta razón, se desarrollaron numerosas innovaciones para llevar a cabo este desafiante proyecto, en particular la organización de un ciclo de construcción continuo y la realización de la plataforma superior horizontal con la luz que debería salvar. [9] [10]

La única parte repetitiva de la construcción residía en las patas, que albergaban aproximadamente la mitad de la estructura a construir. Con el objetivo de cumplir con los plazos impuestos, resultó evidente que había que construir en cuatro días simultáneamente las dos plantas del mismo nivel de cada pata. Pese a que la organización que había que establecer era la habitual de un edificio de características menos singulares, la complejidad era grande, y se debía a elementos como la mega estructura portante (la altura de los encofrados de las vigas de la base y del techo era de nueve metros) constituida por muros de 1,7 metros de

espesor que envuelven los ductos de servicio, las subestructuras internas y las fachadas con su grilla de hormigón, las cuales había que realizar con gran precisión para permitir la futura colocación de los paneles de vidrio.[9]

En cuanto al diseño estructural, el modelo resulta bastante simple y modular. (Figura 4). Los componentes estructurales principales del edificio están compuestos por cuatro pórticos cerrados (color gris) de hormigón pretensado de alta resistencia separados 21 metros entre sí y que forman una grilla de 21 metros de lado tras la superposición con los demás elementos estructurales. [1] [9]

De forma simétrica, en la parte superior e inferior, se encuentran cuatro vigas (color violeta) transversales rígidas vinculados a los pórticos principales que terminan de conformar la cubierta y el basamento. Estas vigas transversales secundarias situadas en la base y en la cubierta tienen como objetivo rigidizar los marcos de la estructura primaria. [9]

Cuatro pilares situados en las esquinas (color amarillo), girados 45 grados, soportan junto con

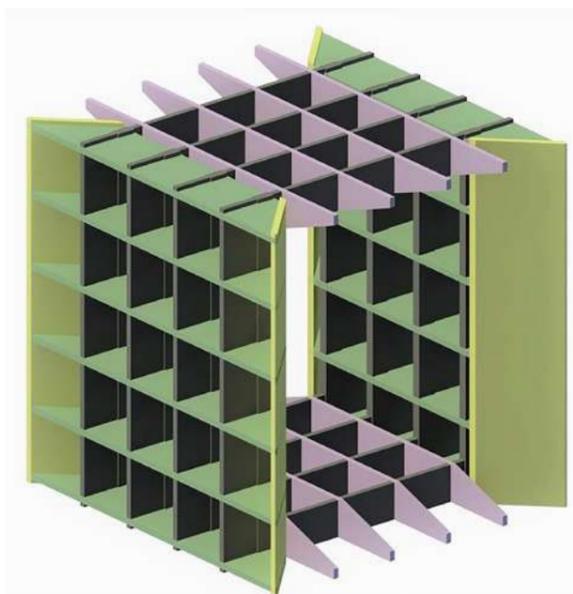


Figura 4 - Esquema de la estructura del arco. Fuente: elaboración propia, basado en otro esquema de la revista A&V monografías N°17 "Paris, Francia" p.45.



Figura 5 - Grúas durante la construcción de los laterales. Fuente: http://ladefense.free.fr/arche/arche_87_05-3.jpg



Figura 6 - Parte del sistema de andamiaje para la construcción superior. Fuente: http://ladefense.free.fr/arche/arche_87_11-10.jpg

los marcos principales seis losas que estabilizan en horizontal (color verde) en cada una de las patas. Estos elementos de rigidización horizontal fueron creados en módulos de siete pisos construidos simultáneamente con la superestructura. [9]

Se destinaron a lo largo de todo el transcurso de la obra ocho grúas para la construcción de las infraestructuras, cuatro para la construcción de la base, cuatro para la construcción de las dos patas, y dos para la construcción de la plataforma superior. (Figura 5). Teniendo en cuenta la falta de espacio, se tuvo que organizar de manera precisa la instalación y posteriormente la utilización de las grúas. Para evitar la sobredemanda de las mismas, todo el hormigón fue vertido mediante bombeo. La organización debía hacer frente a los imprevistos y eran inadmisibles los retrasos. Se prestó una atención particular a la disponibilidad diaria de encofrados y herramientas. [9]

La construcción de la plataforma superior también fue un gran desafío: se trataba de poner en obra más de 30 000 toneladas de hormigón a más de cien metros de altura, por encima del

huevo del arco. La plataforma superior descarga sobre cuatro vigas pretensadas de 110 metros de longitud, 70 metros de luz libre y 9,5 metros de altura, cada una de las cuales pesa 2500 toneladas. Para construirlas, se instaló un pórtico rodante de 90 metros de altura y 70 metros de largo. (Figura 6).

Este imponente dispositivo estaba coronado por pistas con rieles sobre los cuales circulaban los encofrados de diez metros de longitud que permitieron realizar las vigas en siete secciones. Cada una de estas secciones se componía de más de 100 metros cúbicos de hormigón, lo que provocaba presiones muy altas sobre los encofrados. Una vez realizada cada viga, el hormigón fue pretensado, y posteriormente todo el pórtico se desplazó 21 metros para permitir la realización de la siguiente viga. Hay otras vigas secundarias de la misma altura que conectan las vigas principales y terminan en las ménsulas que sostienen los tímpanos en mármol del edificio. La colocación de estas ménsulas en voladizo de 25 metros también fue extremadamente compleja. (Figura 7). [4] [9]



Figura 7 - Construcción de las ménsulas. Fuente: http://ladefense.free.fr/arche/arche_87_11-9.jpg



Figura 8 - Construcción de los pilares. Fuente: Bradley Angell...[et al.] La Grande Arche De La Defense. [en línea]

La dificultad principal se debía a que se construyó el edificio más grande de La Défense en una zona ya muy congestionada en superficie por numerosos edificios terminados y ocupados y vías importantes de circulación como el bulevar circular, pero también en el subsuelo por las líneas del Metro de París, del RER (tren regional), las autopistas y una vía de SNCF. Teniendo en cuenta estas limitaciones, se tuvo que organizar en detalle la implantación de los sistemas de transporte vertical, las zonas de apoyo provisionales, y las zonas de circulación de la maquinaria y del personal. Se utilizó también un tramo de autopista que no estaba todavía en servicio, pero se encontraba a varios cientos de metros de la obra. [10]

Los desafíos principales encontrados durante la ejecución de las obras se debieron a la falta de espacio, a la gran cantidad de trabajos complejos que había que gestionar, a las exigencias de rapidez de ejecución y a la precisión necesaria.

Las actividades de la obra y la duración de cada una de ellas habían sido especificadas en detalle antes del inicio de la construcción. Las exigencias más delicadas a respetar fueron las relativas a la construcción de la estructura y, sobre todo, las relativas al ciclo de cuatro días de las plantas. Este ciclo estaba constituido por una multitud de tareas interdependientes, detalladamente planificadas,

pero sujetas a un gran número de riesgos, en particular el viento, que tuvo su particular incidencia en las maniobras de colocación de los encofrados. [1] [10]

Los cálculos hechos para dimensionar los elementos portantes habían producido importantes requisitos sobre su realización; esto hizo que surgiera la dificultad de la conciliación de las exigencias de velocidad de ejecución con la precisión requerida. Entre estos numerosos requisitos, se pueden mencionar los debidos al pretensado del hormigón, que, por ejemplo, provoca un acortamiento de 4 cm en una viga de 110 metros de longitud. Esta precisión también era necesaria para la colocación de los 25 000 m² de vidrio anti reflectante y los 35 000 m² de mármol de Carrara que revestían las fachadas. [11]

Los principales aspectos estudiados fueron los cimientos, los dispositivos de apoyo y los cálculos estructura, nudos, armaduras y vínculos. Estos estudios resultaron en la realización de tres mil quinientos planos de la estructura, necesarios para la realización del edificio. Las 300 000 toneladas que pesa el edificio encuentran su camino material de descarga a través de doce pilares de hormigón. La base de estos pilotes está a treinta metros por debajo del nivel del suelo, sobre una capa de piedra caliza de catorce metros de espesor, que a su vez

se encuentra sobre una capa de terreno margoso (roca sedimentaria compuesta por calcita y arcilla) de cuarenta y un metros de profundidad. Era la primera vez que se construía en La Défense un edificio que soportara estas cargas. Para contrastar los resultados de los cálculos de los apoyos, durante las obras se realizaron regularmente mediciones de esto, que se mostraron siempre inferiores a las estimaciones calculadas. [9]

Los pilotes están coronados por capiteles que sirven de soporte a la estructura del edificio. (Fig.8). Para absorber las variaciones dimensionales debidas a las deformaciones y a las dilataciones, así como a las vibraciones inducidas por el tráfico rodado y ferroviario, se colocaron cuarenta y ocho placas de neopreno entre los capiteles de los pilotes y la estructura del edificio. Además, se colocaron dispositivos para poder cambiar estas placas durante toda la vida del edificio. Para validar la solución técnica propuesta, se realizó una maqueta idéntica a la solución final. [12]

Teniendo en cuenta la coexistencia de partes en hormigón armado y partes en hormigón pretensado, la necesidad de proporcionar un corte del edificio en tres dimensiones, y la gran cantidad de cálculos necesarios para evaluar los elementos estructurales, se tuvo que realizar una modelización muy detallada del edificio. Estos cálculos mostraron la necesidad de instalar en la obra un dispositivo para mantener verticalmente

las dos patas del edificio hasta que se colocara la plataforma superior (el dintel del arco), debido a que es esta plataforma la que asegura la estabilidad del edificio. Por esta razón, se colocaron cuatro refuerzos equipados de cilindros hidráulicos de dos mil barras cada uno en la planta quince y se mantuvieron hasta el final de las obras. [4] [9]

3. Los materiales empleados

Johan Otto von Spreckelsen y Erik Reitzel utilizaron materiales de gran calidad para la obra: hormigón pretensado con humo de sílice, que combina resistencia y flexibilidad, 25 000 m² de vidrio antireflectante, 35 000 m² de mármol de Carrara. Las caras exteriores del arco están revestidas con placas de vidrio de 5 cm de espesor, tratadas especialmente para impedir cualquier deformación óptica y resistir a los fuertes vientos. Las otras caras estaban revestidas con placas de mármol blanco de Carrara y de mármol gris. [13]

El Arco de la Défense introdujo el hormigón de alto desempeño en su medio. [14]

En el contexto de finales de la década del 80 y principio de los años 90 se podían conseguir con cierta facilidad hormigones con resistencias características a compresión entre 40 y 60 MPa, siempre que se contaran con los áridos y las adiciones adecuadas. Además, en algunos países como Estados Unidos, Noruega y Suecia ya se

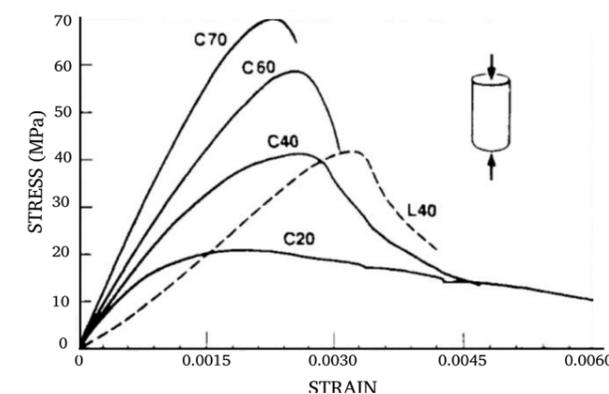


Figura 9 - Curva tensión deformación de hormigones con distintas resistencias a compresión. Fuente: Rodríguez Santiago, Jesús. (1990)

conseguían hormigones con resistencias superiores a los 100 MPa. [14]

Estos hormigones de alta resistencia tienen su campo de aplicación en construcciones de ingeniería civil como pueden ser plataformas marítimas, puentes, entre otros y en edificación civiles como podrían ser edificios de gran altura o requerimientos estructurales más exigentes. [14]

Las principales ventajas que ofrece este hormigón y lo que determinó su uso en el gran Arco de la Défense fueron:

- Disminución de la deformabilidad al aumentar el valor del módulo de deformación longitudinal. Además, la retracción y la influencia pueden reducirse hasta un 50% con respecto a las de los hormigones convencionales.
- Mejora de la durabilidad del hormigón y sus armaduras, debido a la estructura menos porosa del mismo y al elevado contenido de cemento. Mejora también de su comportamiento ante la abrasión y ante la acción del hielo.
- Aumento de la velocidad de construcción de las estructuras, al conseguirse resistencias iniciales que permiten desencofrarlas a edades muy tempranas. Permitted, lo que

se enunciaría anteriormente, la organización de un ciclo de construcción sobre cuatro días en los que había que avanzar hasta alcanzar el mismo nivel simultáneamente en las respectivas plantas de cada una de las patas.

- En edificios en altura, reducción de los efectos del acortamiento de pilares, reducción de dimensiones y por lo tanto el coste de las estructuras, disminución de las deformaciones ante la acción del viento y mejora del amortiguamiento frente a acciones dinámicas.

Sin embargo, estos hormigones tienen un comportamiento más frágil (Figura 9), aunque dicho comportamiento puede mejorarse mediante un diseño muy cuidadoso (zunchado con armaduras, zunchado exterior con chapas en pilares compuestos, principalmente) o mediante el empleo de fibras. [14]

La utilización de estos hormigones requirió el desarrollo de códigos conteniendo criterios para su fabricación y para el cálculo de las estructuras construidas con ellos, ya que los códigos existentes al momento no cubrían este tipo de hormigones.

Actualmente, se continúa investigando sobre aspectos relacionados con el diseño y trabajabilidad de las mezclas, con el comportamiento del hormigón bajo cargas mantenidas o bajo cargas cíclicas (fatiga), etc. [14]

Tabla 1 - Dosificación por m3 de hormigón. Fuente: Rodríguez Santiago, Jesús. (1990)

Cemento Portlando de alta resistencia inicial	425 kg
Humo de sílice	30 kg
Superplastificante (Melment L10)	18 kg
Aditivo retardador	0-3 kg
Agua	170-190 kg
Arena fina	50 kg

Tabla 2 - Características del hormigón. Fuente: Rodríguez Santiago, Jesús. (1990)

Asentamiento	22-25 cm
Resistencia media a compresión (28d)	65.4 Mpa
Resistencia media a compresión (90d.)	72.4 Mpa
Resistencia media a tracción (28d.)	5.5 Mpa

Edificios	Lugar	Año	Pisos	R 28 (Mpa)
900 N. Michigan Annex	Chicago	1986	15	97
South Wacker Tower	Chicago	1989	79	83
Grande Arche	Paris	1988	--	65
Two Union Square	Seattle	1989	58	115
Pacific First Center	Seattle	1989	44	115
Gateway Tower	Seattle	1989	62	94

Tabla 3 - Estructuras contemporáneas al gran Arco de la Défense, resistencias MPa. Fuente: Rodríguez Santiago, Jesús. (1990)

Años	MPa
50's	34 MPa
60's	41 a 52 MPa
70's	62 MPa
90's	138 MPa
2000	158 MPa
2007	250 MPa

Tabla 4 - Desarrollo histórico de f'c (MPa). Fuente: ACI COMMITTEE 363. State of Art Report on High-Strength Concrete [Reporte del estado del conocimiento sobre hormigón de alta resistencia]. ACI 363.R-92

3.1. Análisis del hormigón empleado en el Arco de la Défense.

A continuación, se incluyen datos referentes a uno de los hormigones empleados en la construcción del Arco de la Defensa de París (Tabla 1 y Tabla 2), colocado mediante bombeo en zonas con fuerte densidad de armaduras (hasta 300 kg/m3):

El progreso en el campo de la tecnología del hormigón y del control de calidad, conjuntamente con los nuevos requerimientos de las estructuras, han conducido al desarrollo de hormigones de resistencias cada vez más elevadas.

Realizando una breve reseña histórica, se puede notar que en los primeros años del siglo XX se alcanzaban resistencias de aproximadamente 14 MPa. En los años 30 este valor se había casi duplicado. Al comienzo de los años 50, un hormigón con resistencia a la compresión de 34 MPa., era considerado de Alta Resistencia. En la década del 60, hormigones con valores de resistencia entre 41 y 52 MPa. eran de uso comercial en Estados Unidos. Al comienzo de los 70 se produjeron hormigones de 62 MPa. [15] [16]

En los últimos años se observa un desarrollo notable, tanto en lo que respecta a medios de producción y dosificación

como al conocimiento más acabado de las características reológicas y propiedades mecánicas del hormigón. [16]

Estos avances han permitido la obtención de propiedades mecánicas, trabajabilidad y durabilidad superiores a las habitualmente usadas en hormigones convencionales. [15]

3.1.1 El cemento Portland

La elección del cemento portland para HAD (Hormigón de Alto Desempeño) es extremadamente importante como material constituyente es por eso que se le debe brindar a sus características y propiedades, la mayor atención antes y durante la construcción de la estructura respectiva.

Es muy importante que el cemento empleado tenga una elevada resistencia y uniformidad. La cantidad de cemento por m3 que se utilizará en la mezcla debe ser determinada mediante pastones de prueba. Estos contenidos generalmente están comprendidos entre los 400 y 550 kg./m3 aunque se han realizado estudios con contenidos mayores. Para el caso del hormigón de referencia utilizado en el Arco de la Défense la cantidad de cemento portland de alta resistencia inicial fue de 425kg/m3 ubicándose dentro del rango de los hormigones de alto desempeño. [15] [17]

La relación agua cemento de este hormigón en el entorno de 0.42, (170 -190 kg de agua cada 425 kg de cemento portland) siendo el valor de 0.40 el que sugiere P.C Aïtcin como el límite entre los hormigones comunes y los de alto desempeño.

3.1.2 Las adiciones

La utilización del humo de sílice en la producción de los HAD se incrementó notoriamente en los años 80 y 90, siendo este edificio parisino un claro exponente. Experiencias de laboratorio y obra indican que el hormigón con humo de sílice tiene una tendencia a desarrollar fisuras por contracción plástica. Entonces, se hace necesario cubrir rápidamente las superficies expuestas del hormigón con humo de sílice para prevenir pérdidas rápidas de agua por evaporación; el curado es fundamental. [17]

Se han utilizado en los HAD cementos de escoria y adiciones minerales muy finas consistiendo éstas principalmente en cenizas volantes y humo de sílice.

Por medio de éstas adiciones minerales de extrema finura y químicamente reactivas, se logran llenar los microvacíos del esqueleto granular conformado por agregados y cemento, mejorando la compacidad del material y a la vez, las propiedades reológicas de la mezcla fresca. [15] [17]

Se deduce aquí que la cantidad de agua necesaria puede ser reducida mejorando la resistencia del hormigón. [15] [17]

Por otra parte, éstas adiciones reaccionan a mediano y largo plazo con el hidróxido de calcio producido en la hidratación del cemento portland, dando como resultado compuestos de mucha mayor resistencia. [17]

Para el caso de la dosificación en estudio, la adición empleada fue humo de sílice, a razón de 30kg/m³.

El humo de sílice, llamado también microsílíce o sílice activa es una puzolana altamente reactiva (PAR). Es un subproducto que resulta de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en

hornos de arco eléctrico en la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio. El humo, formado por partículas esféricas muy finas es extraído de los gases de escape de los calderos. [17]

El humo de sílice tiene una superficie específica del orden de los 20.000 m²/kg., la distribución del tamaño de las partículas indica que la mayoría son menores a un micrón. Este material, a causa de su extrema finura y su alto contenido de sílice cumple un papel muy importante en la estructura de la pasta de cemento. [15] [17]

Actúa como relleno físico o filler, aumentando la compacidad de la mezcla. Reduce considerablemente la exudación en el hormigón fresco debido a su gran superficie específica y capacidad para retener agua. Se convierte en agente para la nucleación de los hidratos de cemento, reaccionando puzolánicamente para formar los compuestos cementicios estables de silicato de calcio hidratado (CSH). La disponibilidad de reductores de agua de alto rango ha facilitado el uso del humo de sílice como parte del material cementante para la producción de los HAD.

A través del software Hydra2D desarrollado por el NIST (National Institute of Standards and Technology) que permite simular el proceso de hidratación del hormigón, se realizó la comparación de un hormigón sin adiciones (Figura 10), con el hormigón empleado en el arco de la Défense que incorpora un 7.5% de microsílíce. (Figura 11)

Para simular la hidratación del hormigón sin adiciones se ingresaron en el software 50 partículas de C3S de diámetro 20 y se comenzó a simular la hidratación hasta llegar al 70% (máximo grado de hidratación). Los datos obtenidos se recogen en la tabla 5.

El código de color que utiliza el modelo en es el siguiente: porosidad - negro, C3S - rojo, CSH - amarillo claro, CH - cian claro, relleno inerte - gris oscuro, relleno reactivo (puzolánico) - amarillo oscuro, CSH puzolánico - amarillo oscuro, agregado inerte - magenta, agregado reactivo - azul claro, CH difuso - cyan, CSH difuso - verde. [18]

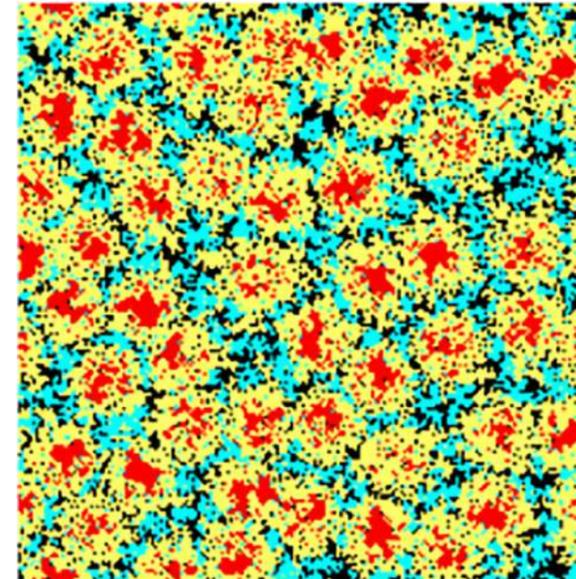


Figura 10 - Hidratación de 50 partículas de C3S de diámetro 20. Fuente Propia empleando Software Hydra2D. NIST

A continuación, para simular la hidratación del hormigón con adición de 7,5% de microsílíce se sustituyó este porcentaje de cemento por adición. Por lo tanto se ingresaron en el software 46 partículas de C3S de diámetro 20 (en vez de 50 como el caso anterior) y incorporó el 7,5% de microsílíce (filler reactivo), la cantidad de

Tabla 5 - Resultados de la simulación de 50 partículas de C3S de diámetro 20. Fuente: Software Hydra2D. NIST

Porosidad	16.2%
Silicato tricálcico C ₃ S	13.0 %
Silicato de Calcio Hidratado CSH	52.1 %
Hidróxido de Calcio CH	18.7 %
Inerte	0.0 %
Gel Puzolánico	0.0 %
Agregados	0.0 %
Filler reactivo	0.0 %

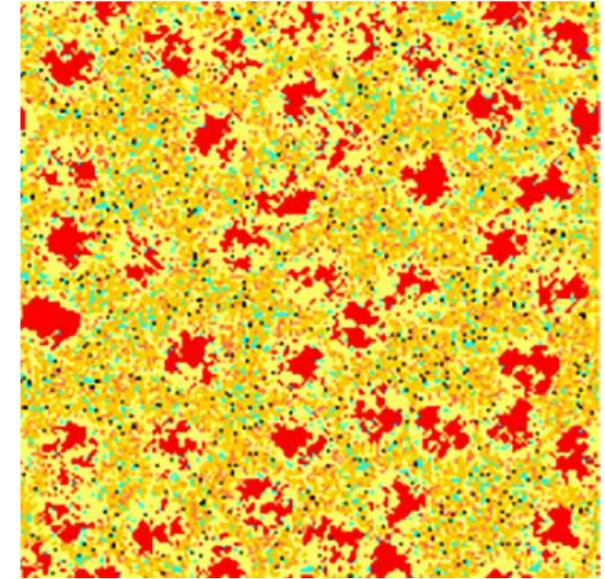


Figura 11 - Hidratación de 46 partículas de C3S de diám 20 y 7,5% de SA. Fuente propia emp. Software Hydra2D. NIST

partículas correspondientes a este porcentaje es de 7450, a partir de estas entradas se comenzó a simular la hidratación hasta llegar al máximo grado de hidratación, con el humo de sílice la hidratación alcanza un porcentaje menor al 70% ya que la microestructura es más compacta Los datos obtenidos se recogen en la tabla 6.

Tabla 6 - Simulación de 46 partículas de C3S de diámetro 20 y 7,5% de SA. Fuente: Software Hydra2D. NIST

Porosidad	1.6%
Silicato tricálcico C3S	16.0 %
Silicato de Calcio Hidratado CSH	41.0 %
Hidróxido de Calcio CH	3.6 %
Inerte	30.2 %
Gel Puzolánico	30.2 %
Agregados	0.0 %
Filler reactivo	7.6 %

De la comparación de los datos recogidos en ambas simulaciones se observa:

- La porosidad del hormigón con la incorporación de microsílíce es casi 10 veces menor que sin la incorporación de adición. La distribución del tamaño de los poros del cemento-PAR (puzolana altamente reactiva) hidratados muestran que los productos de la reacción son eficientes en el llenado de los espacios capilares grandes lo que mejora la resistencia e impermeabilidad del sistema, influyendo directamente en su durabilidad.

-El porcentaje de formación de CH (Hidróxido de Calcio) es menor en el hormigón con adición de humo de sílice ya que la reacción consume óxido de calcio, lo cual es una contribución importante para la durabilidad de la pasta endurecida de cemento frente a medios ácidos. [17]

-Como resultado de la reacción incluyendo la adición, los vacíos capilares fueron eliminados o reducidos en tamaño, siendo los cristales de hidróxido de calcio sustituidos por CSH (41%) de igual densidad que el CSH formado en el hormigón sin adición, y la formación de CSH de menor densidad (30.2%) nombrado como gel puzolánico. La formación total de CSH es de 71.2% (41% + 30.2%) respecto al 52.1% de CSH en el hormigón sin adición.

Desde el punto de vista de la resistencia, se puede demostrar que, al menos en lo que respecta

al hormigón convencional y para el hormigón de alto desempeño de clase I (50 a 75MPa), el incremento de resistencia es muy significativo cuando la dosis de humo de sílice está entre 5% y 10%, pero una incorporación mayor reduce el aumento de la resistencia. Por tanto, puesto que el costo extra de este humo de sílice adicional es alto y deberá utilizarse más superplastificante para dispersarlo.[17]

Según lo anterior, los contenidos normales varían entre el 5 y el 10 % del peso del cemento, haciendo la relación entre los 425 kg/m3 de cemento y los 30kg/m3 de humo de sílice empleado observamos que el porcentaje utilizado en este hormigón de referencia fue del 7.5%, situándose dentro de los parámetros recomendados por la bibliografía.

3.1.3 Los aditivos

Los aditivos son ampliamente utilizados en la producción de los HAD.

La selección del tipo, marca, y dosificación de todos los aditivos, debe hacerse considerando el conjunto de materiales que se utilizarán en determinado proyecto. [15]

En este caso de dosificación el aditivo empleado fue el Superplastificante Melment L10 a razón de 18kg/m3 cuyas características se detallan en la siguiente tabla. (Tabla 5)

Forma física	Solución acuosa
Apariencia	Turbio claro a ligeramente lechoso, incoloro a ligeramente amarillento
Cont. De sólidos [%]	39.0 a 41.0
Densidad (20°C) [g/cm3]	5.5 MPa
Valor Ph (20°C)	9.0 a 11.4
Dosificación recomendada [%] en relación al peso del cemento	0.5 a 2.5

Tabla 7 - Ficha técnica superplastificante Melment® L 10 Fuente: BASF Technical data sheet. [en línea] https://www.basf.com/us/.../Melment_L10_40_TDS.pdf

Melment® L 10/40% es una solución acuosa de un producto de policondensación sulfonada a base de melanina. La reducción de agua de los superplastificantes de base melamínica es similar a la de los que tienen por base naftalenos, pero los primeros mejoran considerablemente las resistencias a edades tempranas, lo cual colaboró también en el cumplimiento del ciclo de 4 días de avance simultáneo de ambas patas del pórtico: fue posible desencofrar en menor tiempo. [19]

Melment® L 10/40% está formulado como plastificante y reductor de agua para hormigones. Los campos de aplicación son, por ejemplo: hormigón prefabricado, hormigón pretensado, hormigón visto, entre otros. [19]

Los aditivos reductores de agua de alto rango, superplastificantes, o superfluidificantes son materiales sin los cuales no se hubieran desarrollado los HAD hasta los niveles actuales. [15]

El superfluidificante es muy efectivo en la defloculación y dispersión de las partículas de cemento, son aditivos altamente eficientes cuando se utilizan adecuadamente, por medio de él es posible:

- 1) Aumentar la trabajabilidad del hormigón sin adición de agua.
- 2) Dispersar las partículas del cemento de tal forma que los hormigones puedan fabricarse usando menos agua de la necesaria para una completa hidratación de la pasta.
- 3) Se pueden producir pastas de cemento hidratado lo suficientemente estables y densas para unirse fuertemente a los agregados y al acero de refuerzo para producir un material compuesto muy resistente.
- 4) Hacer hormigones tan densos que pueden ser más resistentes y durables que muchas rocas naturales.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que la introducción de superplastificantes en el

hormigón involucra un nuevo compuesto químico en un complejo sistemas de aglutinantes hidráulicos el cual ya contiene varios añadidos químicos. [15] [17]

No debe sorprender que, en estos complejos sistemas, en los cuales cada componente ha sido individualmente optimado, se pueden desarrollar problemas de incompatibilidad. [17]

3.1.4 Los agregados

Tanto el árido fino como el grueso utilizado, deben cumplir como mínimo los requerimientos de las normas de los reglamentos vigentes.

Un agregado fino con partículas de forma redondeada y textura suave ha demostrado que requiere menos agua de mezclado, y por lo tanto es preferible en los HAD. Se acepta habitualmente, que el agregado fino causa un efecto mayor en las proporciones de la mezcla que el agregado grueso. Los primeros tienen una mayor superficie específica y como la pasta tiene que recubrir todas las superficies de los agregados, el requerimiento de pasta en la mezcla se verá afectado por la proporción en que se incluyan éstos.

Una óptima granulometría del árido fino es determinante por su requerimiento de agua en los HAD, más que por el acomodamiento físico.

La experiencia indica que las arenas con un módulo de finura (MF) inferior a 2.5 dan hormigones con consistencia pegajosa, haciéndolo difícil de compactar. Arenas con un módulo de finura de 3.0 han dado los mejores resultados en cuanto a trabajabilidad y resistencia a la compresión.

La granulometría del agregado fino tiene, entonces, un rol importante. Por ejemplo, un exceso en el pasante de los tamices N° 50 y N° 100 incrementará la trabajabilidad pero se hará necesario aumentar el contenido de pasta para cubrir la mayor superficie de estas partículas, además de generar el riesgo de tener que incluir más agua a la mezcla. [15] [17]

Respecto a los agregados gruesos, numerosos estudios han demostrado que para una resistencia a la compresión alta con un elevado contenido de cemento y baja relación agua-cemento el tamaño máximo de agregado debe mantenerse en el mínimo posible.

En principio el incremento en la resistencia a medida que disminuye el tamaño máximo del agregado se debe a una reducción en los esfuerzos de adherencia debido al aumento de la superficie específica de las partículas.

Se ha encontrado que la adherencia a una partícula de 76 mm. es apenas un 10% de la correspondiente a una de 12,5 mm., y que excepto para agregados extremadamente buenos o malos, la adherencia es aproximadamente entre el 50 a 60% de la resistencia de la pasta a los 7 días.

Las fuerzas de vínculo dependen de la forma y textura superficial del agregado grueso, de la reacción química entre los componentes de la pasta de cemento y los agregados.

Otro aspecto que tiene que ver con el tamaño máximo del agregado es el hecho de que existe una mayor probabilidad de encontrar fisuras o fallas en una partícula de mayor tamaño provocadas por los procesos de explotación de las canteras (dinamitado) y debido a la reducción de tamaño (trituración), lo cual lo convertirá en un material indeseable para su utilización en hormigón.

También se considera que la alta resistencia producida por agregados de menor tamaño se debe a una baja en la concentración de esfuerzos alrededor de las partículas, la cual es causada por la diferencia de los módulos elásticos de la pasta y el agregado.

Se ha demostrado que la grava triturada produce resistencias mayores que la redondeada. Esto se debe a la trabazón mecánica que se desarrolla en las partículas angulosas. Sin embargo, se debe evitar una angulosidad excesiva debido al aumento en el requerimiento de agua y disminución de la trabajabilidad a que esto conlleva.

El agregado ideal debe ser limpio, cúbico, anguloso, triturado 100%, con un mínimo de partículas planas y alargadas.

Resulta obvio destacar que un HAD requiere agregados de resistencia elevada. No serviría de nada obtener una pasta de cemento muy resistente con una zona de transición con características similares, si el agregado que se utiliza es débil y de mala calidad. [15] [17]

4. Desempeño de los materiales

A partir de 2015, se inició un plan de renovación con una inversión de 192 millones de euros a cargo de la empresa francesa Eiffage. (Figura 12)

Uno de los problemas fundamentales estuvo relacionado con los revestimientos del edificio. El mármol resultó ser demasiado poroso, por lo que absorbía demasiada agua, aumentaba su tamaño y se desengancha. El mármol gris de las fachadas norte y sur tuvo que ser sustituido por granito al igual que el mármol blanco de las fachadas este y oeste. [13]

Alrededor de una de cada seis placas presentaba alteraciones atribuibles a la descomposición granular del mármol de Carrara, un desgaste prematuro materializado por deformaciones y grietas, los desprendimientos de piezas eran tales que se estableció un perímetro de seguridad al pie del edificio. [13]

Según su calidad, el mármol de Carrara es más o menos poroso y sensible a las variaciones térmicas, cuando se congela, por ejemplo, el agua acumulada puede filtrarse y causar grietas, además la contaminación del aire, sensible en el distrito de la Defensa, que tampoco ayudó en el desempeño del revestimiento. (Figura 13)

El arquitecto Von Spreckelsen había decidido usar también mármol gris el cual es mucho más poroso que el blanco, lo que resultó en un problema aún mayor en las fachadas norte y sur. [13]



Figura 12 - Comienzo de las obras de reparación. Fuente: <https://elodieboyer.com/snap/la-trame-rayee/>



Figura 13 - Eflorescencias y manchas en el revestimiento antes de las obras de restauración. Fuente: <https://www.archdaily.cn/cn/601216/ad-classics-grande-arche-slash-johann-otto-von-spreckelsen/503812f528ba0d599b000cb8-grande-arche-johann-otto-von-spreckelsen-photo-by-flickr-user-dekay>

Pasados 26 años desde de su construcción inicial, el desgaste de algunos componentes y los nuevos requerimientos señalaron la necesidad de una revisión integral. Esto llevó a un proyecto de renovación destinado a renovar y mejorar el edificio, respetando el diseño original. [21]

Tras negociaciones competitivas para la fase de diseño y construcción, el gobierno francés confió a Eiffage, en asociación con los arquitectos Valode & Pistre, el trabajo para rehabilitar y mejorar la eficiencia técnica del edificio. [21]

Entregado en junio de 2017, el proyecto requirió un total de 27 meses de trabajo y la movilización de hasta 700 empleados en los períodos pico. Eiffage Services proporcionará mantenimiento para el esqueleto estructural y el mantenimiento del mirador hasta el año 2034. [21]

El mármol de las fachadas fue reemplazado por un granito blanco conocido como "Bethel White", extraído de una cantera en Vermont, EE. UU. El

tratamiento de superficie específico que recibe asegura el mismo tono y brillo que el mármol original. (Figura 14).

El grupo Fischer proveyó alrededor de 76000 anclajes del tipo FZP II. Comparada con la fijación por los bordes utilizada originalmente, esta técnica logra mejores momentos flectores y una mayor capacidad de carga, esto permite la instalación de paneles más delgados y de mayor tamaño en comparación con la instalación mediante fijaciones de bordes. En comparación con las soluciones anteriores, este nuevo sistema de fijación permite reemplazar paneles de forma individual si es necesario. [21] [22]

Los cuatro ascensores panorámicos fueron rehabilitados, ya que estuvieron cerrados desde el año 2010, vuelven a llevar al público hacia la terraza mirador situada en el piso 35. La nueva estructura de techo del gran Arco cuenta con una pasarela de 110 metros de largo y 10 metros de ancho que ofrece una vista de 360 ° sobre el gran París. [21]



Figura 14 - Revestimiento de granito blanco “Bethel White” luego de la restauración. Fuente: <https://www.polycor.com/realisation/commercial/architectural-projects/grande-arche-de-la-defense/>

5. Consideraciones finales

La elección de François Mitterrand en 1981 buscó marcar su período de cinco años gestión a través de grandes obras para París, además de renovar el Louvre, la Ópera de París o la Ciudad de la Música, se comenzó a ampliar la perspectiva de los Campos Elíseos más allá del Arco de Triunfo. De allí surge el proyecto del gran Arco de la Défense del arquitecto Johan Otto von Spreckelsen.

Este edificio de carácter monumental busca imponerse desde varios ángulos, a través de su forma, su ubicación, su geometría y su tecnología de ejecución.

A través de su forma, los arcos de triunfo han sido construidos en Francia desde tiempos romanos, luego, en la era de Napoleón Bonaparte y finalmente resignificados con este edificio. Desde el punto de vista simbólico, la concepción del edificio no fue sencilla. El arquitecto podría haber optado por una torre según la tradición de todos los centros financieros del mundo, pero optó por un edificio contemporáneo con la forma de un tradicional arco triunfal. Esto produjo un híbrido y contribuyó a su interpretación ambigua como símbolo y como objeto urbano determinado por su contexto. [2]

Por medio de su ubicación, este edificio vino a determinar uno de los ejes urbanos con mayor

carga cultural del mundo, desde el patio del Louvre, hasta el adyacente Arco del Carroussel, la Plaza de la Concordia y el Arco de Triunfo, hizo que Spreckelssen viera su nuevo arco como “una ventana al mundo” que ofreciera una “panorámica del futuro”. Este eje en que está situado el edificio es también una representación de la evolución política de la humanidad desde el absolutismo monárquico (Louvre), al heroísmo de la revolución (Plaza de la Concorde), seguida de la grandeza del imperio (Arco de Triunfo) la burguesía decimonónica (Campos Elíseos) y terminando en el Estado y el triunfo del capitalismo en La Défense. [2]

Desde el punto de vista de la geometría, el rigor con que se ha utilizado demuestra una relación casi obsesiva con la simetría: el gran Arco es un cubo con un vacío, su fachada está cubierta con placas de mármol de formato cuadrado y perforadas por ventanas de formato cuadrado. Como una vasta acumulación de repeticiones geométricas, el Arco está en la disyuntiva de ser un edificio o un artefacto que pertenece a la esfera de los monumentos impecables. La perfección geométrica: un enfoque posmoderno de la monumentalidad. [23]

Desde el enfoque en la tecnología de la construcción y los materiales empleados, este edificio buscó denotar su impronta innovadora también en su materialización. Su construcción presentó un

desafío sin precedentes en su contexto cuyas principales dificultades estaban relacionadas con los estudios de la estructura y la elección de los métodos y materiales de construcción. Este edificio significó una nueva marca de la ingeniería del cemento de su época, fue el que introdujo el estilo constructivo high-tech en su medio empleando un material innovador para su época: el hormigón de alto desempeño.

El gran Arco de la Défense: ¿Un desafío? Si, un desafío superado.

Referencias

- [1] CHASLIN, François y PICON-LEFEBVRE, Virginie (1989). *La Grande Arche de La Defense*. Paris: Electa Moniteur. ISBN: 2866530624.
- [2] TZONIS, Alexander y LEFAIVRE Liane (1993). *La Arquitectura en Europa desde 1968*. Barcelona: Ediciones Destino. pp. 224-225.
- [3] *La Grande Arche, Le ciel a son avenue. The Grande Arche, National Symbol of France*. [En línea], <https://www.lagrandearche.fr/en/history>. [Consulta: 25 mayo 2019].
- [4] DAUGE, Yves. dir *Mission Interministérielle de Coordination des grandes opérations d'architecture et d'urbanisme*. (1989). *Architectures Capitales*. Paris 1979-1989. Paris: Electa Moniteur. ISBN: 2-86653-041-1.
- [5] DOTTELONDE, Pierre (2009). *La Défense: L'esprit et le temps* (en francés). Paris: Le Cherche-midi. p. 50. ISBN 978-2-7491-1023-3.
- [6] CAMINO DE BROADBENT, Gloria (1992). “Johan Otto von Spreckelsen. La Grande Arche, La Défense”, en revista *Architectural Design*, vol. 62, Nº 1/2, pp.66-71, Academy Group, Londres, enero / febrero 1992. ISSN: 0003-8504.
- [7] A&V MONOGRAFIAS (1989). “Ventana hacia el futuro. El gran arco de La Défense. Arquitectos: Johan Otto von Spreckelsen, con Paul Andreu”, en revista A&V monografías Nº17 “Paris, Francia”, pp.42-47, Arquitectura Viva S.L., Madrid. ISSN: 0215-487X.
- [8] MANGIN, David (1987). “La Grande Arche de la Défense”, en revista *L'Architecture d' Aujourd'hui* Nº252, pp.66-79, Groupe Expansion, Paris, septiembre 1987. ISSN: 0003-8695.
- [9] DAGUINOT, Christian (1989). “La tête défense: les études de la structure”. Paris: *Instantanés techniques*. ISSN 0994-0758
- [10] BASCHIERA, Léo (1989). “La tête défense: le choix des méthodes de construction”. Paris: *Instantanés techniques*.
- [11] ROCHEFORT, Henri (1989). “La tête défense: le parcours des hommes de travaux”. Paris: *Instantanés techniques*
- [12] Wayback Machine, Internet archive. *La grande Arche de la Défense* (Paris, La Défense). [En línea], http://www.coyne-et-bellier.fr/dun/gsp/fiche_grandarche.html. [Consulta: 27 mayo 2019]
- [13] *Le Figaro.fr. Économie. Fragile, l'Arche de la Défense reste sous étroite surveillance*. [En línea], <http://www.lefigaro.fr/immobilier/2012/06/06/05002-20120606ARTFIG00701-fragile-l-arche-de-la->

- defense-
reste-sous-etroite-surveillance.php.
[Consulta: 2 junio 2019]
- [14] RODRIGUEZ SANTIAGO, Jesús. (1990) “Nuevas Tendencias en estructuras de hormigón” Madrid: ICET/CSIC.
- [15] CÚNEO SIMIAN, Hugo A. (2010) “Hormigón de alto desempeño para estructuras”. Centro de Investigaciones Avanzadas en Tecnología del Hormigón, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- [16] ACICOMMITTEE363.StateofArtReportonHigh-Strength Concrete [Reporte del estado del conocimiento sobre hormigón de alta resistencia]. ACI 363R-92.
- [17] AÏTCIN, P.C. (1998) “High Performance Concrete”. Londres: E & FN Spon.
- [18] NIST. Exercise no. 1 Interfacial Zone Microstructural Development. [En línea], <https://ciks.cbt.nist.gov/~garboz/educmod/node12.html>. [Consulta: 20 mayo 2019]
- [19] BASF. BASF Technical data sheet. [en línea] https://www.basf.com/us/.../Melment_L10_40_TDS.pdf [Consulta: 25 mayo 2019].
- [21] EIFFAGE Construction. Showcase Projects. Renovation of the Grande Arche, La Défense. [En línea], <http://www.eiffageconstruction.com/expertise/showcase-projects/renovation-of-the-grande-arche>. [Consulta: 2 junio 2019]
- [22] FASTENER + FIXING Magazine. Façade Construction in the fourth dimension. [En línea], <https://www.fastenerandfixing.com/construction-fixings/facade-construction-in-the-fourth-dimension/> [Consulta: 2 junio 2019]
- [23] BÖER, Wulf. The Displacement of the Grande Arche: The Story of a Surreal Monument. [En línea], https://www.academia.edu/35130699/The_Displacement_Of_The_Grande_Arche_The_Story_of_a_Surreal_Monument. [Consulta: 3 junio 2019]

Como curso de actualización profesional en UdelaR se incluyó una asignatura denominada Hormigones Especiales, iniciada en el curso 1995, siendo Gemma Rodríguez responsable de la misma, convirtiéndose en pocos años en una asignatura de posgrado.

Este documento contiene trabajos que presentan temas generales y aspectos específicos de estos hormigones que contribuirán a captar la atención del alumno y actuarán como agente motivador para adquirir un mayor conocimiento sobre ellos integrando las obras realizadas con hormigones especiales. En paralelo hay trabajos que diferentes obras construidas con hormigones especiales, realizadas por los alumnos de la asignatura en el Posgrado de Construcción de Obras de Arquitectura de FADU-UdelaR así como en Educación Permanente. Con ello se pretende acercar al alumno a la temática y las obras ubicadas en su entorno más próximo potenciando un mayor conocimiento de las distintas infraestructuras que lo configuran; a su vez, generar un banco de datos relativo a este patrimonio construido que contribuya a un mayor conocimiento y divulgación del empleo de hormigones especiales en Uruguay.

Montevideo, Setiembre de 2020