



Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Caminos, Canales y Puertos

Universidad de Castilla-La Mancha. Campus de Ciudad Real

Innovación

en Ingeniería de Caminos, C. y P.

Revista de los alumnos de Máster, ETSI Caminos, C. y P. — UCLM



Volumen 1, año 2022

Sumario

Presentación	iii
Lista de revisores	iv
Breve revisión del potencial de la energía eólica marítima con especial atención a la variedad tipológica de las cimentaciones de turbinas eólicas marítimas <i>Víctor Cabezas Sánchez</i>	1
Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas tipo SMA-8 modificadas con la adición de polvo de caucho frente a la generación de ruido de rodadura. <i>Alejandra Gil Abarca</i>	5
La madera como elemento estructural sostenible para viviendas. Mejora de sus propiedades y accesibilidad en países en desarrollo: caso de Gatlang <i>Blanca María Lara Vázquez</i>	10
Metodología para la priorización de intervenciones en redes de abastecimiento de pequeños y medianos municipios <i>Lucía Cabezas Sánchez</i>	14
The use of reclaimed asphaltic pavement (RAP) on highways schemes <i>Carmen Coronado García-Cuevas</i>	18
Green concrete: building in a modern and ecological way <i>Hugo Alejandro Bohorquez Aliaga</i>	22
Reduce energy consumption in the building by storing energy in phase change materials <i>Mehrdad Shishegaran</i>	26
La evolución del tratamiento de agua potable y su consumo energético <i>Pedro Ivar Bohorquez Aliaga</i>	31
Environmental impact assessment of Haraz's Dam construction <i>Mohammad Asgari</i>	35
Estudio de las características y de las ventajas e inconvenientes del uso del hormigón pretensado de alta resistencia <i>Ángela Montalvo Martín de Almagro</i>	39

Presentación

Este primer volumen de *Innovación en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos* contiene una selección de los artículos escritos por los alumnos del primer curso del *Máster en Ingeniería de Caminos, C. y P.*, en la asignatura *Innovación e Investigación en Ingeniería Civil*.

La asignatura presenta, a través de conferencias y visitas, la investigación e innovación que se hace en todos los campos de la ingeniería civil, que es esencial para el desarrollo de su tecnología específica. Además, en la asignatura se enseñan las herramientas de comunicación oral y escrita para transmitir dichos resultados. En particular, explicamos cómo se redactan artículos científicos —y, por analogía, cualquier otro documento científico-técnico— y el proceso de su publicación en una revista científica.

Redactar un artículo científico requiere tener una investigación o innovación que contar, pero también es necesario conocer la técnica para hacerlo. Se ha de revisar con detalle la estructura del artículo, normalmente compuesta de título, resumen, introducción, descripción de la metodología de la investigación, presentación de resultados, discusión y referencias bibliográficas. Asimismo, se ha de repasar cómo presentar la información gráfica (figuras y fotos), las tablas y las fórmulas. Se debe conocer el estilo en que escribir un artículo científico, en especial cuando se usa la lengua inglesa. Finalmente, debe conocerse el procedimiento de selección de la revista adecuada para publicar el artículo, y cómo debe realizarse la comunicación con la revista en todas sus fases (con el editor, los revisores y el equipo editorial).

En la asignatura planteamos la redacción de un artículo en el que poner en práctica lo aprendido durante el curso. El artículo siempre se somete a revisión por pares en sistema simple ciego (el autor no sabe quién le revisa), pero este año hemos incluido otra revisión por parte de profesores e investigadores de la Escuela, especialistas en el tema del artículo, a quienes agradecemos enormemente su generosa contribución a la mejora de los escritos. Los autores han corregido sus artículos a la vista de las observaciones de las dos revisiones, consiguiendo así documentos de calidad, tanto en el contenido como en el formato. Una selección de los artículos —los que obtuvieron una calificación de notable o superior— es la que se publica en este primer volumen de *Innovación en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos*.

Esperamos que esta revista contribuya tanto a difundir los aspectos más novedosos de la ingeniería civil, como a estimular a nuestros estudiantes a estar en la vanguardia del conocimiento en su campo y a saber comunicarlo.

Ana Rivas Álvarez & Gonzalo Ruiz López

Profesores de Innovación e Investigación en Ingeniería Civil
Ciudad Real, diciembre de 2022

Lista de revisores

Profesores e investigadores de la ETSI Caminos, C. y P.

Laura Asensio Sánchez
Carmen Castillo Sánchez
José María Coronado Tordesillas
Ángel De La Rosa Velasco
Santiago Expósito Paje
Víctor Fernández Vázquez
Álvaro Galán Alguacil
Javier González Pérez
José Antonio Lozano Galant
Vicente Navarro Gamir
Rocío Porras Soriano
Elisa Poveda Bautista
Ana Rivas Álvarez
Luis Rodríguez Romero
Rita Ruiz Fernández
Gonzalo Ruiz López
David Sánchez Ramos
Santos Sánchez-Cambronero García-Moreno
Ángel Yustres Real

Alumnos de Innovación e Investigación en Ingeniería Civil

Mouad Ajahou
Mohammad Asgari
Hugo Alejandro Bohorquez Aliaga
Pedro Ivar Bohorquez Aliaga
Lucía Cabezas Sánchez
Víctor Cabezas Sánchez
José Joaquín Cabrera Gómez
Matthieu Comes
Carmen Coronado García-Cuevas
Louise François
Sara García Fernández
Chloe Germain
Alejandra Gil Abarca
Blanca María Lara Vázquez
Ángela Montalvo Martín de Almagro
Antonio Nieto Vallejo
Ramón Penalba Barcos
Mehrddad Shishegaran
Emilio Soriano Mercado

BREVE REVISIÓN DEL POTENCIAL DE LA ENERGÍA EÓLICA MARÍTIMA CON ESPECIAL ATENCIÓN A LA VARIEDAD TIPOLOGICA DE LAS CIMENTACIONES DE TURBINAS EÓLICAS MARÍTIMAS

Víctor Cabezas Sánchez¹

¹ Innovación e Investigación en Ingeniería Civil
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Castilla-La Mancha
Av. Camilo José Cela s/n, 13071, Ciudad Real, España
* Contacto: victor.cabezas@alu.uclm.es

RESUMEN

El empleo del viento es una fuente de energía renovable para generar electricidad, es una energía limpia, posee un gran potencial para descarbonizar la economía y las actividades sociales y presenta un gran valor para ser empleada en la industria pesada como fuente estable de energía de bajas emisiones de carbono. Esta energía eólica puede dividirse a su vez en energía eólica terrestre (la más empleada tradicionalmente desde hace siglos, que ha presentado un gran salto cualitativo y cuantitativo en las últimas décadas) o energía eólica marina (con un desarrollo más reducido en el mismo tiempo). No obstante, la explotación del potencial de la energía eólica está ligado en el presente al desarrollo de la técnica de las cimentaciones de las turbinas en mar abierto. El presente trabajo muestra una revisión de las tipologías existentes y en desarrollo de las cimentaciones de las turbinas de energía eólica marina.

PALABRAS CLAVE: Energía eólica, turbinas eólicas marinas, cimentaciones de turbinas marinas

ABSTRACT

The use of wind is a renewable energy source for generating electricity, is a clean energy, has great potential to decarbonise the economy and social activities and has great value for use in heavy industry as a stable source of energy with low carbon emissions. Wind power can be further divided into onshore wind power (the most traditionally used for centuries, which has made a great qualitative and quantitative leap in recent decades) or offshore wind power (with a smaller development in the same time). However, the exploitation of wind power potential is currently linked to the development of offshore turbine foundations. This paper presents a review of existing and developing typologies of offshore wind turbine foundations.

KEYWORDS: Wind power, offshore wind turbine, offshore turbine foundation

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la potencia instalada de fuentes de producción de energía renovable ha notado un aumento considerable, fundamentalmente por el desarrollo de una tecnología cada vez más madura que permite obtener energía en grandes cantidades a partir del movimiento del agua, el movimiento del aire, la luz del sol o la energía térmica transmitida por el sol; pero también por los objetivos climáticos de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero asociados a la quema de los combustibles fósiles empleados tradicionalmente; y en menor medida, a la búsqueda de una independencia energética en localizaciones remotas que no requieran el transporte del propio combustible a emplear en la generación eléctrica.

Dentro de las energías renovables destaca, en primer lugar, la energía hidroeléctrica. No obstante, no es previsible un gran crecimiento en el futuro de dicho método de generación eléctrica debido a la limitación de emplazamientos adecuados para la construcción de nuevas grandes presas.

En segundo lugar, con un 6,59 % de la producción eléctrica mundial en 2021 (ver figura 1), se sitúa la energía eólica, que tal y como auguran algunas proyecciones pasará a representar el 20 % de la demanda eléctrica en 2050 [1].

Actualmente, la producción de energía eólica presenta dos grandes vertientes diferentes: la energía eólica terrestre (*onshore*) y la generación eólica marina (*offshore*). La primera de ellas ha sido ampliamente

empleada desde comienzos de siglo, aunque, como se comentará más adelante presenta diferentes limitaciones y desventajas. Por su parte la tecnología eólica marina está empezando a extenderse de forma intensiva, buscando mayores potencias instaladas de generación por turbina y distancias mayores a la costa, en las que se localizan vientos de mayor intensidad. No obstante, estas localizaciones presentan peculiaridades en las cimentaciones que deben resolverse con tecnología específica, en pleno y constante desarrollo.

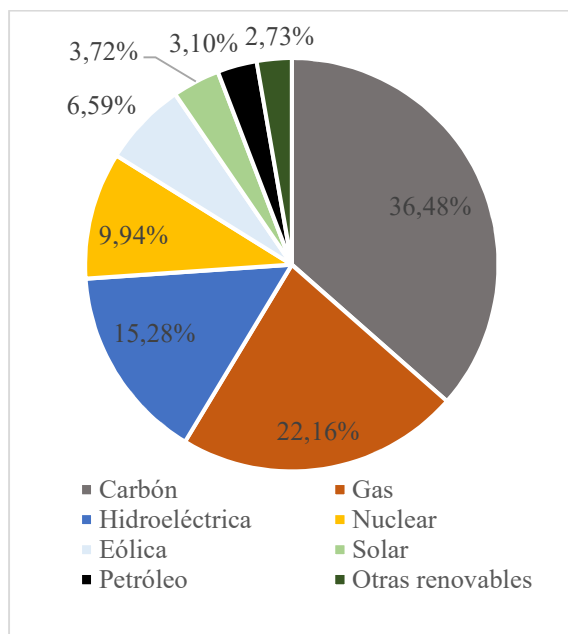


Figura 1. Proporción de la producción mundial de electricidad por origen en 2021. Fuente: [2].

2. ENERGÍA EÓLICA TERRESTRE

La energía eólica terrestre puede obtenerse mediante el empleo de diversas tecnologías a diferentes escalas, desde la pequeña generación de la micro eólica [3] a la generación de las grandes turbinas. Para obtener una reducción de costes y mayores rendimientos en el transporte de la energía, se emplean parques eólicos terrestres a gran escala.

2.1. Parques eólicos terrestres

Los parques eólicos terrestres son una agrupación de grandes turbinas eólicas de gran altura, con unos requerimientos de distancia entre molinos que generan una gran ocupación en planta. Debido a estos condicionantes, presentan una serie de desventajas e impactos medioambientales y visuales [4] que se comentarán a continuación.

Un alto porcentaje de los parques eólicos terrestres se encuentran en localizaciones remotas de altitud elevada, por lo que precisan una instalación complementaria de gran longitud para conectar el parque a la red, con las consiguientes pérdidas de energía.

Numerosos estudios han probado el efecto directo e indirecto sobre la fauna, especialmente sobre las aves y mamíferos voladores, de las plantas de generación de energía por diversos motivos: impactos sobre las hélices de las turbinas, efectos de los destellos de las balizas de las turbinas, etc. No obstante, estos efectos son menores que los producidos por otras tipologías de generación eléctrica.

La contaminación acústica provocada por el movimiento de las turbinas es un impacto importante generado por los parques eólicos, y especialmente destacable en las cercanías de zonas residenciales. El ruido generado por los mismos puede ser mecánico o aerodinámico, generando un zumbido (*whooshing*) constante. Si bien este impacto puede reducirse con la implementación de medidas adecuadas en la fase de diseño, no es posible reducir considerablemente su impacto en los parques ya construidos.

La disposición de las turbinas eólicas terrestres como elementos verticales de gran altura (varias decenas de metros) visibles desde grandes distancias presenta un notable impacto visual muy rechazado por la población (*Verspargelung*).

Igualmente, el movimiento de las hélices junto con la combinación del sol a baja altura provoca un movimiento periódico de las sombras similar al efecto estroboscópico, con un gran impacto visual en las áreas cercanas.

3. ENERGÍA EÓLICA MARINA

Una alternativa cada vez más empleada debido a las limitaciones anteriormente comentadas para la energía eólica terrestre (entre otros motivos) es la energía eólica marina, puesto que su disposición en el mar (e incluso a veces varios kilómetros mar adentro) provoca una reducción en la intensidad de los factores limitantes anteriormente mencionados o directamente la ausencia de dichos factores.

3.1. Parques eólicos marinos

Para ahorrar costes y emplear el efecto de la masa crítica a su favor, la energía eólica marina también debe disponerse en parques eólicos.

Además, como ya se ha comentado anteriormente, las instalaciones de parques eólicos marinos apenas muestran impactos negativos, mientras que los indicadores desfavorables en la mayoría de los índices de impacto medioambiental recogidos en la bibliografía son muy reducidos [5].

Debido a los factores comentados, el crecimiento actual de la energía eólica marina es mayor en términos porcentuales que el de la energía eólica terrestre [6]. Por

otro lado, se estima que la potencia instalada en los parques eólicos marinos en Europa pasará de 25 GW instalados en 2020 a 47 GW instalados en 2025 [7], lo que supone casi una duplicación en la potencia instalada.

La tabla 1 muestra los tres mayores parques eólicos marinos por potencia instalada a fecha de 2022.

Tabla 1. Tres mayores parques eólicos marinos por potencia instalada.

Parque eólico	País	Potencia (MW)
Hornsea Project One	Reino Unido	1218
Triton Knoll	Reino Unido	857
Jiangsu Qidong	China	802

3.2. Variedad tipológica de las cimentaciones de turbinas eólicas marinas

Las condiciones intrínsecas de la ubicación de los molinos eólicos marinos, junto con la profundidad existente en el emplazamiento determinado provocan la existencia de mayores variedades tipológicas de cimentación (en comparación con los parques eólicos terrestres), como se muestra en la figura 2. Por tanto, es esencial conocer las diferentes tipologías empleadas, desde las más tradicionales hasta las más innovadoras, para adoptar la solución más adecuada al proyecto que se desea realizar.

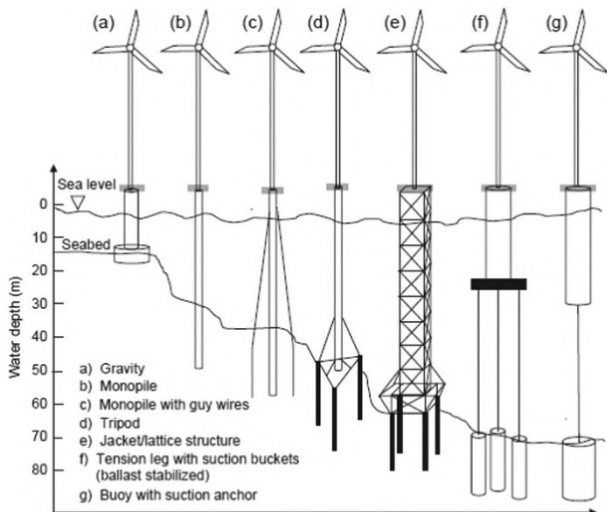


Figura 2. Diferentes cimentaciones en función de la profundidad del mar. Fuente: [8].

De menor a mayor profundidad, estas cimentaciones son: cimentaciones fijas, que incluyen cimentación por gravedad (a), monopilote (b), monopilote con cables tensores (c), trípode (d), celosía (e); y cimentaciones flotantes, entre las que se encuentran la *tension leg* con cajones de succión (f) y la boya con anclaje de succión (g). A continuación, se revisan las principales características de cada sistema.

Las cimentaciones de gravedad permiten resistir los esfuerzos y el vuelco de la estructura fundamentalmente con el peso propio de la misma. Consiste en un cajón de hormigón armado, por lo que requiere una capacidad portante adecuada del terreno. Además, su uso está limitado a profundidades de entre 10 m y 20 m. Esta cimentación fue la empleada en las etapas tempranas del desarrollo de la tecnología eólica marina por su facilidad constructiva y su similitud con la cimentación de otras estructuras marinas más desarrolladas. Como ejemplo de parque eólico marino de cimentación de gravedad destaca Vindeby, Dinamarca (1991), que fue el primer parque eólico marino del mundo, con una potencia instalada de 49,5 MW.

Las cimentaciones basadas en un monopilote emplean un tubo de acero de gran diámetro (entre 4 m y 8 m) que transmite la carga de la estructura generatriz y los esfuerzos al terreno. Esta tipología permite su uso sobre gran variedad de terrenos, aunque puede diferir la instalación en el terreno (instalación por vibración, uso de martillos de impacto o perforación según dureza creciente del terreno). Esta tipología es adecuada para profundidades entre 20 m y 40 m, aunque presenta una mayor versatilidad que otros métodos. Debido a que la tecnología necesaria para su construcción es sencilla, ha sido empleada ampliamente en multitud de parques eólicos marinos. Scroby Sands, Reino Unido (2004), con 60 MW de potencia, es un parque marino que emplea esta tipología de cimentación.

Las cimentaciones con monopilote pueden alcanzar mayores profundidades, generalmente hasta 50 m, mediante el empleo de cables tensores que reducen los esfuerzos de flexión del monopilote. No obstante, esta tecnología no ha sido muy empleada.

Las cimentaciones en trípode son una variación de los monopilotes, puesto que en lugar de prolongar el monopilote bajo el terreno apoyan sobre un trípode de acero, que presenta mayor estabilidad, con tres patas dispuestas en forma de triángulo equilátero. La cimentación del trípode puede realizarse de forma previa a su instalación o a través de las propias patas mediante pilotaje. Esta tipología fue la empleada en algunas turbinas del parque Alpha Ventus, Alemania (2010), que fue el primer parque eólico de Alemania, con 60 MW instalados.

Las cimentaciones a base de celosía están formadas por barras de acero en una distribución tridimensional. Esta cimentación presenta la ventaja de la prefabricación en tierra, con el posterior transporte y hundimiento a la localización definitiva. Pueden emplearse en un rango amplio de profundidades, hasta los 60 m, siendo las profundidades de 50 m a 60 m su rango óptimo de empleo. No obstante, requieren una cuidadosa planificación logística desde la fabricación hasta la puesta en obra, pasando por el transporte al emplazamiento definitivo y su posible almacenamiento

temporal. Como ejemplo de un parque que emplea esta tipología, puede mencionarse Ormonde, Reino Unido (2012).

Para el uso de molinos eólicos a profundidades mayores a 60-80 m se hace imprescindible recurrir a tecnologías de cimentación flotantes, que abaratan sustancialmente los costes (en comparación con las tecnologías anteriores para dichas profundidades).

Las cimentaciones *tension leg* emplean una pequeña plataforma sobre la que se sitúa la estructura, unida a uno o varios cajones de succión (cajones que permanecen en el terreno por una diferencia de presión) mediante tirantes. Esta tecnología está volviéndose cada vez más popular, pero todavía está en una etapa inicial de desarrollo. Uno de los primeros parques eólicos en emplear esta tecnología fue Frederikshavn, Dinamarca (2003).

Por último, las cimentaciones mediante boya con anclaje de succión emplean una boya anclada al fondo marino. Esta boya debe proporcionar capacidad de flotación suficiente para soportar el peso propio de la estructura y contener los movimientos de oscilación, cabeceo y balanceo dentro de unos límites aceptables [9]. Los sistemas de boyas empleados son cada vez más complejos, e incluso existen diseños (ninguno realizado todavía), de generadores eólicos sobre plataformas flotantes, que permiten alcanzar profundidades notablemente superiores. Por su parte, los anclajes muestran una gran diversidad, pudiendo ser de tipo gravedad (peso muerto), pilotes de anclaje, anclajes de arrastre, placas de anclaje o cajones de succión. Esta tipología es la opción preferida para profundidades superiores a 80 m [9]. Uno de los primeros parques comerciales en emplear esta tecnología fue Hywind Scotland, Escocia (2017).

CONCLUSIONES

El presente documento ha servido de breve revisión a la energía eólica a gran escala, sus impactos y los motivos del auge de la energía eólica marina, realizando un compendio de las cimentaciones existentes para la misma.

Como se ha visto en el artículo, el incipiente pero importante desarrollo de la tecnología de parques de turbinas eólicas marinas está provocando un acercamiento a los límites disponibles en el diseño de cimentaciones a gran profundidad en mar abierto, generando la necesidad de soluciones innovadoras aplicadas recientemente y, sin duda alguna, de nuevas soluciones que aparecerán en los desarrollos futuros en los próximos años.

REFERENCIAS

- [1] PREMALATHA, M., et al. Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2014), vol. 31, p. 270-288.
- [2] Ember Global Electricity Review (2022).
- [3] LOGANATHAN, Bavin, et al. Design of a micro wind turbine and its economic feasibility study for residential power generation in built-up areas. *Energy Procedia* (2019), vol. 160, p. 812-819.
- [4] SAIDUR, Rahman, et al. Environmental impact of wind energy. *Renewable and sustainable energy reviews* (2011), vol. 15, no 5, p. 2423-2430.
- [5] WAGNER, Hermann-Josef, et al. Life cycle assessment of the offshore wind farm Alpha Ventus. *Energy* (2011), vol. 36, no 5, p. 2459-2464.
- [6] KOMUSANAC, Ivan et al. Wind Energy in Europe. 2021 Statistics and the Outlook for 2022-2026. *WindEurope Business Intelligence* (2022).
- [7] SOARES-RAMOS, Emanuel PP, et al. Current status and future trends of offshore wind power in Europe. *Energy*, (2020), vol. 202, p. 117787.
- [8] WU, Xiaoni, et al. Foundations of offshore wind turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2019), vol. 104, p. 379-393.
- [9] CASTRO-SANTOS, Laura; DIAZ-CASAS, Vicente (ed.). *Floating offshore wind farms*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing (2016).

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIPO SMA-8 MODIFICADAS CON LA ADICIÓN DE POLVO DE CAUCHO FRENTE A LA GENERACIÓN DE RUIDO DE RODADURA.

A.G. Abarca¹

¹ Estudiante de Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Castilla-La Mancha.

Avda. Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real, España.

Persona de contacto: Alejandra.GAbarca@uclm.es

RESUMEN

Las propiedades de las mezclas asfálticas utilizadas en las carreteras influyen en la generación del ruido de rodadura producido por la interacción entre los neumáticos y el pavimento. Actualmente, muchos investigadores se encuentran trabajando en la consecución de pavimentos silenciosos, que logren reducir significativamente el ruido en torno a las principales vías de comunicación y permitan mejorar la calidad de los servicios que se encuentran en las proximidades de las mismas. En los últimos años y en el camino a los pavimentos silenciosos, se está experimentando con la generación de nuevas mezclas asfálticas cuya composición está modificada con la adición de materiales reciclados, como es el polvo de caucho. La finalidad de este estudio es evaluar la variación que supone la adición de polvo de caucho en la generación del ruido de rodadura. Algunas de las variables consideradas como relevantes para la posible reducción de la generación del ruido son la rigidez dinámica, la textura de los pavimentos y la resistencia al deslizamiento, por lo que estas propiedades de los pavimentos son estudiadas en detalle en el presente artículo para unas mezclas del tipo SMA-8 de idéntica composición, pero con diferente contenido en polvo de caucho. Los resultados de los ensayos realizados mostrarán si, efectivamente, el nuevo material implementado en las mezclas asfálticas produce mejoras en los niveles sonoros o si, por el contrario, no se obtienen unos resultados satisfactorios. De manera paralela a la consecución de la reducción de la contaminación acústica, se habrá de garantizar que los futuros pavimentos cumplan con las condiciones mínimas de seguridad para los vehículos que circulan a través de las vías.

PALABRAS CLAVE: Mezcla SMA, Ruido de rodadura, Pavimentos, Ensayos de rigidez dinámica, Polvo de caucho.

ABSTRACT

The properties of the asphalt mixtures used on roads influence the generation of rolling noise produced by the interaction between tires and the pavement. Currently, many researchers are working on achieving silent pavements, which manage to significantly reduce the noise around the main communication routes and can improve the quality of the services that are located in their vicinity. In recent years and on the way to silent pavements, experiments are being carried out with the generation of new asphalt mixtures whose composition is modified with the addition of recycled materials, such as crumb rubber. The purpose of this study is to evaluate the variation that the reduction of crumb rubber implies in the generation of rolling noise. Some of the variables considered relevant for the possible reduction of noise generation are dynamic stiffness, pavement texture and rolling resistance, so these pavement properties are studied in detail in this article for some SMA-8 type mixtures of identical composition, but with different crumb rubber content. The results of the tests carried out show whether, effectively, the new material implemented in the asphalt mixtures produces improvements in noise levels or if, on the contrary, satisfactory results are not obtained. Parallel to achieving the reduction of noise pollution, it will be necessary to guarantee that future pavements meet the minimum safety conditions for vehicles circulating on the roads.

KEYWORDS: SMA Mixture, Rolling noise, Pavements, Dynamic stiffness tests, Crumb rubber.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido generado por la rodadura es una cuestión que causa preocupación en el entorno de las carreteras. Para conseguir mitigarlo, pueden considerarse distintas estrategias enfocadas en el estudio de los propios mecanismos de generación del ruido.

La rigidez dinámica es uno de los factores que puede contribuir a la mayor o menor generación del ruido. La utilización un material reciclado, como es el polvo de caucho en el presente estudio, siendo más flexible, podría reducir la rigidez dinámica del pavimento y, como consecuencia, reducir los niveles sonoros durante su vida útil.

No menos relevante en relación al ruido es la textura del pavimento. De acuerdo con la literatura, la principal interacción entre neumático y pavimento está relacionada con la textura (Sandberg, 1987) [1]. En este ámbito, ciertas mezclas que poseen más irregularidades, huecos y, consecuentemente, más textura, serán las generadoras de mayores niveles de ruido.

En los últimos años, en este campo de la investigación, cabe destacar algunos de los artículos publicados por Vázquez et al (2020) [2] y (2016) [3, 4]. Estos estudios, evalúan el comportamiento de distintas mezclas en relación al ruido y comprenden la metodología y base teórica que ha servido de referencia para la realización del presente artículo.

En este caso, se pretende estudiar si, con la adición de partículas de polvo de caucho, la textura de la mezcla objeto de estudio se rellena, traducándose este hecho en una textura menor y, de manera análoga al caso anterior, si se obtienen niveles sonoros reducidos.

Para evaluar las características anteriores, se han realizado ensayos de rigidez dinámica y ensayos de textura mediante perfilómetro láser, los cuales permitirán conocer las características de las distintas mezclas y su comportamiento teórico en relación al ruido. Para verificar la información obtenida de una manera más práctica, se lleva a cabo un tercer método de evaluación, el ensayo de resistencia al deslizamiento. Mediante esta prueba, se pretende evaluar si en probetas de mezclas asfálticas que hayan mostrado tener más textura, se obtiene una mayor resistencia al deslizamiento y, por tanto, los niveles de ruido generados son más significativos.

2. MEZCLAS ESTUDIADAS

El material objeto de estudio en esta investigación consiste en una mezcla asfáltica de tipo SMA-8. De esta mezcla tipo SMA-8 se tienen cinco series de probetas de características idénticas, excepto en cuanto al contenido en polvo de caucho, que varía según porcentaje entre las distintas series.

Las mezclas SMA-8 se han elegido para la realización de este estudio debido a sus características especiales: estas mezclas son mezclas bituminosas discontinuas y, de partida, reducen el ruido por su configuración (Mioduszewski y Gardziejczyk, 2016) [5]. Además, estas mezclas han sido fabricadas añadiendo polvo de caucho mediante un procedimiento en seco. Los pavimentos estudiados se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de las series de referencia estudiadas SMA-8. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de pavimento	Características constructivas
SMA-8	Mezcla bituminosa en caliente bien graduada. Betún de grado de penetración convencional 50/70. Adición de polvo de caucho mediante procedimiento en seco.
Ref 1	0.3% de polvo de caucho.
Ref 2	0.5% de polvo de caucho.
Ref 3	1% de polvo de caucho.
Ref 4	1.5% de polvo de caucho.
Ref 5	2% de polvo de caucho.

3. MÉTODOS DE MEDIDA

3.1. Rigidez dinámica

La rigidez dinámica de un pavimento es una característica relacionada con la deformación de la superficie y, a su vez, con la generación del ruido producida entre los neumáticos y el pavimento. La rigidez dinámica se define como la relación existente entre la fuerza que actúa en una estructura (F) y el desplazamiento que se produce en su superficie (x) (Fahy y Walker, 2004) [6].

La rigidez dinámica ha sido evaluada en este trabajo por el Método No Resonante, utilizando un excitador de vibraciones y una cabeza de impedancia (Vázquez et al., 2016a) [7]. La cabeza de impedancia es capaz de detectar las variaciones en la superficie de las probetas objeto de ensayo y, conectados los equipos de medida mencionados con una computadora que analiza los datos, se obtienen los espectros de rigidez dinámica. Con dichos espectros, se realizará la comparativa entre las diferentes mezclas ensayadas.

3.2. Textura

Los perfiles superficiales de las probetas de estudio se han obtenido mediante la utilización de un perfilómetro láser. Este equipo recoge, además de otros parámetros, la profundidad media del perfil de la superficie que posee cada una de las probetas ensayadas, denominada de forma abreviada MPD y según la norma vigente (ISO 13473-1, 2019). Con estos datos de profundidad, se ha implementado un modelo mediante el software MATLAB mediante el cual se obtienen los espectros de textura que caracterizan a cada una de las mezclas de

estudio. Con dichos espectros de textura, se realizará la comparativa entre las diferentes mezclas ensayadas, determinando así aquellas mezclas que poseen una mayor macrotextura.

3.2. Resistencia al deslizamiento

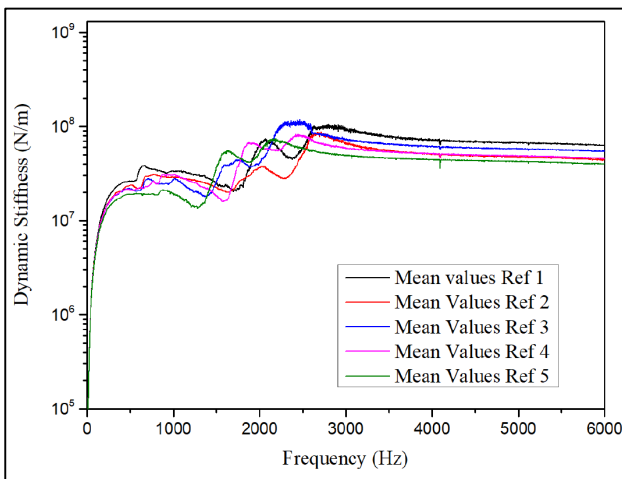
Este método consiste en la determinación de la resistencia al deslizamiento de un determinado pavimento frente a la rodadura de un vehículo. Este ensayo es llevado a cabo en el laboratorio mediante el péndulo de fricción y según la norma (UNE-EN 13036-4, 2019). Una vez calibrado el péndulo, se llevan a cabo lecturas en condiciones de pavimento seco y mojado, determinándose los valores de resistencia al deslizamiento de las mezclas objeto de ensayo.

4. ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Espectro de rigidez dinámica

Las medidas han sido llevadas a cabo para evaluar las diferencias existentes en el comportamiento de las mezclas con la adición de polvo de caucho. Con las medidas de rigidez dinámica, un espectro medio de rigidez dinámica es obtenido para cada una de las referencias de las mezclas SMA-8 estudiadas. En el Gráfico 1, pueden observarse los espectros medios resultantes de cada serie de referencia.

Gráfico 1: Espectros de rigidez dinámica medios asociados a las series de referencia. Fuente: Elaboración propia.



A partir del anterior espectro medio, los valores medios de rigidez dinámica a comparar entre las distintas referencias se han seleccionado para una frecuencia de 400 Hz, de acuerdo con otros estudios [8], donde se afirma que, en este rango de frecuencias, la rigidez dinámica afecta al ruido generado entre el neumático y el pavimento.

Los resultados muestran una tendencia a la disminución de la rigidez dinámica cuando el contenido de polvo de caucho aumenta. Este hecho podría representar un esperanzador avance en la consecución de la reducción del ruido de rodadura, ya que está relacionado con la rigidez dinámica. Cabe resaltar que existen múltiples investigaciones realizadas sobre el uso de caucho reciclado en mezclas del tipo SMA, donde la adición de polvo de caucho ha resultado en una disminución del ruido [3,9].

4.2. Espectro de textura

Partiendo de los datos de MPD arrojados por el perfilómetro láser utilizado y operando con el software MATLAB, se han obtenido los espectros de textura para el rango de frecuencias que engloba la macrotextura y la microtextura. Así, para evaluar la evolución de la textura con la adición de polvo de caucho, se ha seleccionado el rango de la macrotextura, comprendida entre las frecuencias 0,05 y 50 milímetros, para evaluar si existe una tendencia en los resultados obtenidos. Los espectros de textura medios para cada serie de referencia pueden verse en detalle en el Gráfico 2. Los valores medios de textura para cada serie de referencia y para las frecuencias más representativas de la macrotextura, pueden observarse en detalle en el Gráfico 3.

Gráfico 2: Espectros de textura medios asociados a las series de referencia. Fuente: Elaboración propia.

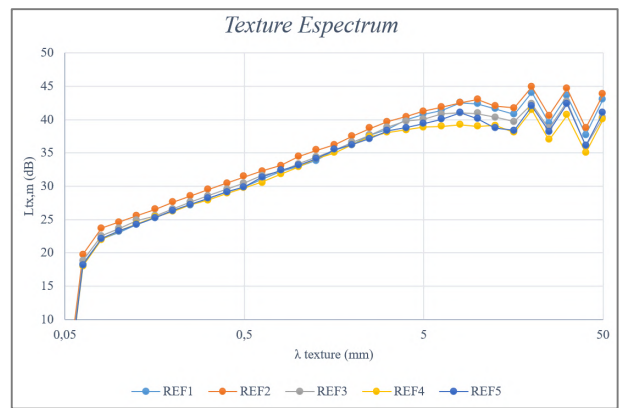
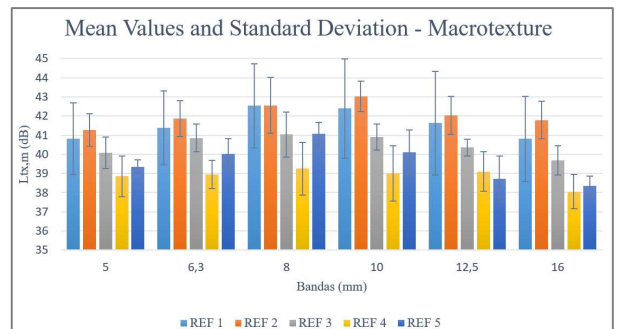


Gráfico 3: Valores medios de textura para las frecuencias más representativas del rango de la macrotextura. Desviación estándar de los valores obtenidos. Fuente: Elaboración propia.

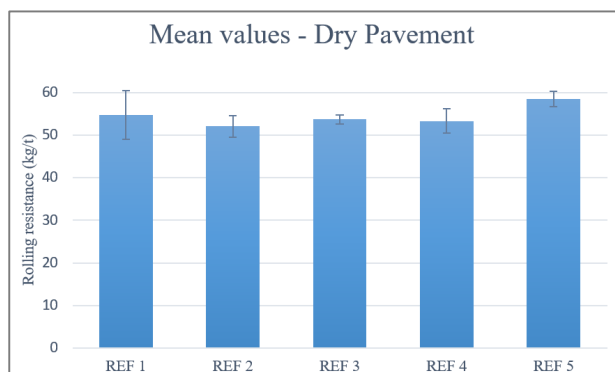


A la vista de los resultados, y poniendo atención en el rango de frecuencias correspondiente a la macrotextura, se intuye una tendencia a que, con la adición de polvo de caucho, el pavimento presenta una menor textura. Este hecho podría traducirse en que el polvo de caucho añadido a las mezclas iniciales es capaz de rellenar las irregularidades de las mezclas, consiguiéndose así un pavimento más uniforme y generador de menores niveles de ruido.

4.3. Resistencia al deslizamiento

En esta sección se evalúan las diferencias existentes con la adición de polvo de caucho en la resistencia al deslizamiento, la cual está estrechamente relacionada con el ruido de rodadura. Para la presente evaluación, se muestran en el Gráfico 4 los valores medios de resistencia al deslizamiento en pavimento seco de cada una de las series de referencia y la desviación estándar que poseen las medidas realizadas. Realizando un análisis global, los resultados obtenidos no son claros, ya que los valores medios son muy próximos y las desviaciones estándar se solapan.

Gráfico 4: Valores medios de resistencia al deslizamiento y desviación estándar para las series de referencia estudiadas. Fuente: Elaboración propia.



Cabe resaltar que, este ensaño se ha complementado con medidas de ruido registradas con un sonómetro calibrado y, evaluando los resultados acústicos, se desprende que los niveles de ruido generados tienden a disminuir con la adición de polvo de caucho. Este descubrimiento llevaría a pensar que el polvo de caucho disminuye la generación de ruido y, en cambio, no minora la capacidad del pavimento para resistir al deslizamiento.

5. CONCLUSIONES

La rigidez dinámica es una de las características de los pavimentos estrechamente relacionada con la reducción del ruido de rodadura. Evaluando los resultados obtenidos tras el periodo de ensayos realizado, existe una tendencia a la disminución de la rigidez dinámica con la adición de polvo de caucho, lo que se traduciría en una

posible disminución del ruido de rodadura, al convertirse el pavimento en un medio ligeramente más elástico.

Si se tiene en cuenta la textura de las mezclas SMA-8 objeto de estudio, las conclusiones que pueden obtenerse son compatibles con las anteriores. Según se produce un aumento en el contenido en polvo de caucho, las mezclas ensayadas presentan una textura más suave, por lo que los niveles de ruido producidos por los impactos y las vibraciones durante su vida útil serán menores, disminuyendo la generación del ruido de rodadura.

Mediante el ensayo de resistencia al deslizamiento, complementado con la utilización de equipos de medida de sonido, se ha comprobado que, con la adición de polvo de caucho se mantiene la resistencia de los pavimentos al deslizamiento, pero, como ventaja, se reducen los niveles de ruido generados.

Teniendo en cuenta los problemas de seguridad y durabilidad de las carreteras en la actualidad, la clave estará en encontrar un balance entre la reducción del ruido de rodadura y el mantenimiento de unos pavimentos lo suficientemente seguros y duraderos.

6. REFERENCIAS

- [1]. Sandberg, U., 1987. The influence of the road surface and its characterization. Road traffic noise. Applied Acoustics. 21, 97-118.
- [2]. Vázquez, V.F., Terán, F., Page, S.E., 2020. Dynamic stiffness of road pavements: Construction characteristics-based model and influence on tire/road noise. Science of the Total Environment. 736, 139-149.
- [3]. Vázquez, V.F., Paje, S.E., 2016b. Study of the road surface properties that control de acoustic performance of a rubberized asphalt mixture. Applied Acoustics. 102, 33-39.
- [4]. Vázquez, V.F., Luong, J, Bueno, M., Terán, F., Paje, S.E., 2016. Assessment of an action against environmental noise: acoustic durability of a pavement Surface with crumb Rubber. Science of the Total Environment. 542, 223-230.
- [5]. Mioduszewski, P., Gardziejczyk, W., 2016. Inhomogeneity of low-noise wearing courses evaluated by tire/road noise measurements using the close-proximity method. Applied Acoustics. 11, 58-66.
- [6]. Fahy, F., Walker, J., 2004. Advanced applications in acoustics, noise and vibration. Routledge Taylor & Francis Group, New York.
- [7]. Vázquez, V.F., Page, S.E., 2016a. Dynamic stiffness assessment of construction materials by the resonant and non-resonant methods. J. Nondestruct. Eval. 35, 34.

[8]. Vázquez, V.F., Page, S.E. Dynamic stiffness assessment of bituminous mixtures Type SMA according construction characteristics. International Congress on Sound and Vibration, Florence, Italy, 12-16 July, (2015).

[9]. Sandberg, U., Ejsmont, J.A., 2002. Tyre/road noise reference book. Informex, Sweden.

**LA MADERA COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL SOSTENIBLE PARA VIVIENDAS.
MEJORA DE SUS PROPIEDADES Y ACCESIBILIDAD EN PAÍSES EN DESARROLLO:
CASO DE GATLANG**

B.M. Lara Vázquez

Grupo de Colaboración en el poblado de Gatlang en Nepal, Stupa.
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Universidad de Castilla-La Mancha.
Av. Camilo José Cela 2, 13071 Ciudad Real-España
* Persona de contacto: blancamaria.lara@alu.uclm.es

RESUMEN

El presente documento es un trabajo que defiende la madera como elemento estructural debido a la eficiencia energética que ésta presenta a la hora de la construcción en comparación con el uso de otros materiales convencionales. Se ejemplifica su uso en sociedades como la japonesa, donde la madera ha pasado de ser artesanía a elemento industrializado fundamental en la construcción. En busca de la protección de dicho material y de la mejora de sus propiedades para su mayor funcionalidad, se recopilan diferentes formas de actuar descritas en la literatura priorizando la sostenibilidad y simplicidad. El fin es aplicar estos métodos en lugares en desarrollo, y más concretamente en Gatlang (Nepal), a raíz del proyecto constructivo de viviendas que realicé en mi TFG.

PALABRAS CLAVE: Madera, Sostenible, Construcción, Protección

ABSTRACT

This paper is a work that defends wood as a structural element due to the energy efficiency that it presents at the time of construction compared to the use of other conventional materials. Its use is exemplified in societies such as Japan, where wood has gone from being a craft to a fundamental industrialized element in construction. In research of the protection of said material and the improvement of its properties for its greater functionality, different ways of acting are compiled, prioritizing sustainability and simplicity. The objective is to apply these methods in developing areas, more specifically in Gatlang (Nepal), taking into consideration the building project I realized for my TFG.

KEYWORDS: Wood, Sustainable, Construction, Protection

1. INTRODUCCIÓN

La madera ha estado al lado del hombre desde tiempos inmemoriales tanto en la construcción de estructuras civiles como puentes, vehículos como barcos, maquinaria como molinos, etc. En la construcción de viviendas, hasta hace poco ha sido el material más usado y, a pesar de la aparición de nuevos materiales, sigue produciéndose en igual cantidad que el acero y sólo 4 veces menos que el hormigón [1]. A continuación, se exponen las ventajas y oportunidades de la madera, así como las desventajas y cómo paliarlas, con el fin de buscar métodos sencillos y sostenibles a emplear en zonas en desarrollo.

2. PROPIEDADES DE LA MADERA

Aparentemente, la madera puede creerse más débil que otros materiales constructivos como el acero o el hormigón. Sin embargo, nada más lejos de la realidad, la madera tiene mayor resistencia a tracción, compresión y rotura frágil que el hormigón como se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1. Módulo elástico, resistencia a tracción, compresión y rotura frágil por unidad de peso de diferentes materiales. (Datos obtenidos de [1])

Material	E/ρ	σ _{trac} /ρ	σ _{comp} /ρ	K _{IC} /ρ
Madera	20-30	120-170	60-90	1-12
Acero con bajo %C	26	30	—	18
Aleación de aluminio	25	180	130	8-16
Hormigón	15	3	30	0,08

Aunque son datos generales, los observados en la tabla 1, pues hay que tener en cuenta que, por ejemplo, la madera, es un material ortótropo, tiene diferentes resistencias según el plano de aplicación de la carga: paralelo o perpendicular al grano.

Aparte de sus propiedades mecánicas, la madera es asequible y accesible, además de que, como material orgánico, cuenta con procesos de autorrecuperación en cuanto a daños menores.

Por último, conviene hablar dos propiedades claves: La madera es más eficiente energéticamente que otros materiales, ya que consume menos energía en su producción, como se muestra en la tabla 2. Además, es más sostenible, pues actúa como contenedor de CO₂ (un metro cúbico de madera puede guardar hasta una tonelada de CO₂ [2]). Se evalúa un potencial alcanzable para el almacenamiento neto de carbono de alrededor de 46 millones de toneladas de CO₂-eqy. por año en 2030 [3].

Tabla 2. Requerimiento de energía para la producción de materiales.(Datos obtenidos de [4])

Material	KWh/ton	KWh/m ³
Hormigón 1:3:6	275	600
Hormigón 1:2:4	360	800
Cemento	2.200	2.860
Mortero	277	400
Acero	13.200	103.000
Alumino	27.200	75.600
Madera local secada al aire	200	110
Madera verde	200	220
Plásticos	45.000	47.000

Sin embargo, la madera tiene poca capacidad de retención térmica, por lo que, como se indica en [5], conviene combinarla en construcción de viviendas con materiales acumulativos de energía. Suele usarse mampostería para las paredes y hormigón para el suelo, que además contribuyen al aislamiento acústico.

Japón, es el segundo país del mundo en el que más viviendas de madera se construyen y donde sigue siendo este el material preferido por los constructores, seguido del acero y, en último lugar, el hormigón [6]. En el mismo artículo se da a conocer el crecimiento continuo de demanda de madera a Europa por parte de Japón por contar con hornos de secado industriales (entre 1990 y 2000 se multiplicó por 50), lo que abre las puertas a nuevas oportunidades de mercado.

3. MEJORAS DE LA MADERA

Por otro lado, la madera presenta mayor índice de deterioro frente al hormigón o al acero, debido a su composición: es un material poroso e higroscópico (contiene hidroxilos que favorecen la absorción del agua) [7]. Al contenido de agua va asociada la aparición de hongos e insectos. Es conveniente mantener la humedad por debajo de un 20%, pues los hongos se encuentran inactivos. También lo están por debajo de los 20°C y mueren por encima de los 35°C. Por su parte, las termitas pueden filtrar la humedad a la madera desde el suelo, por eso conviene aislar bien la estructura. Para repeler la humedad pueden usarse resinas junto con productos químicos.

El fuego es otro factor de riesgo para las estructuras de madera, si bien éstas son capaces de mantener su resistencia mejor que las de acero. La madera comienza a desprender gases inflamables cuando alcanza los 100°C, que se incendiarán en presencia de una llama al

superar los 250°C. En ausencia de llama, la madera no arde hasta los 500°C. Para prevenir, es conveniente usar pinturas, favorables también frente a radiación solar, y productos de base silíceo. Mayores espesores ralentizan el quemado, sin ser tan importante la densidad.

Para mejorar las propiedades mecánicas: secado, ahumado y compuestos químicos resultan favorables. En la tabla 3 se recogen algunos tratamientos que aumentan la resistencia de la madera frente a los fenómenos mencionados.

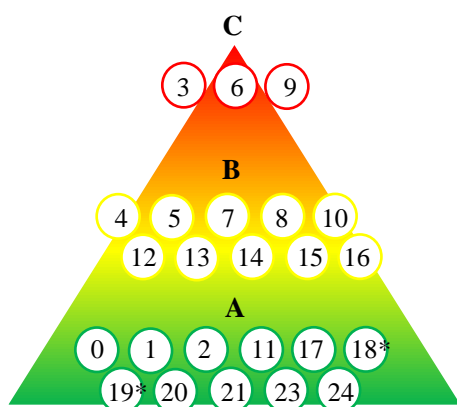
Tabla 3. Resistencias y mejoras en la madera implementadas por los distintos tratamientos. (Elaboración propia. Datos obtenidos de: ver [1])

Tratamiento	W C	H	T	U V	F M	R	P
0. Secado [8]	X					X	N/A
1. Laca [8]	X	X					N
2. Aceite vegetal [8]	X						N
3. Poliuretano [8]	X						A
4. Resina alquídica [8]	X						A
5. Polietilenglicol [8]	X	X					A
6. Formaldehidos [8]						X	A
7. Anhídrido acético [8]	X	X					A
8. Ácido carboxílico (madera eterificada) [8]			X				A
9. Pentaclorofenol [8]		X					A
10. Tributilestano [8]		X				X	A
11. Resina emulsionada + catalizador hierro [9]	X						N-A
12. Pintura alquídica [10]	X	X		X	*	X	A
13. Pintura de base de agua [10]	X	X		X	*		A
14. Pintura de base disolvente [11]	X	X		X	*		A
15. nano-TiO ₂ [12]				X			A
16. Silica [13]		X			X		A
17. Organosilicios [14]		*					A
18. Aceite Lampante + anhídrido maleico [15]	X	X					N-A
19. Resina +silicona [16]	X		X	X			N-A
20. Alcoxilanos (Siloxanos) [17]	X				X		A
21. Shellac [18]		*	X				N
22. Retardadores del fuego con nitrógeno y fósforo [19]					X		A
23. Ahumado [20]						X	N
24. Furfural [21]	X	X	X			X	N-A

- Resistencia a WC (humedad); H (Hongos); T (Termitas); UV (Radiación solar); F (Fuego); H*: Parcialmente resistente; F*: Resistente a altas temperaturas;
- Mejora de RM (Resistencia mecánica);
- P (Proceso): N (Natural); A (Artificial).
N/A: el proceso puede hacerse de ambas formas
N-A: el proceso implica ambos

Dichos tratamientos son encontrados en la literatura científica más reciente. Además, para buscar la simplicidad, se comparan los productos de la tabla 3, sus aplicaciones y su origen, con el fin de que se necesite el mínimo proceso industrial posible para obtenerlos, favoreciendo aquellos que sean naturales.

Se buscan así aquellos productos que ayuden a paliar las carencias de la madera. Sin embargo, siguiendo la línea ecológica actual, no sólo basta con que el producto sea efectivo, también es necesario que no sea dañino para el ser humano y el medio ambiente. He realizado una clasificación de la toxicidad en la figura 1, aunque entiéndase con cierto valor subjetivo por no estar sujeta a parámetros matemáticos. Se divide así en toxicidad “A”: son aquellos métodos que no tienen efectos negativos o son despreciables para el ser humano y el entorno o aquellos que podrían llegar a resultar perjudiciales en una fase del proceso, pero no en uso. Toxicidad “B”: aquellos que pueden provocar irritación por contacto o inhalación. Toxicidad “C”: Productos cancerígenos.



*el complemento de la resina tiene toxicidad B

Figura 1. Mapa de toxicidad de los tratamientos. (Elaboración propia)

Como conclusión de este apartado, se puede observar que aquellos tratamientos que tienen en conjunción un origen natural y toxicidad A: secado, laca, aceite vegetal, resinas (complementadas con catalizador de hierro, anhídrido maleico o silicona, siendo los dos últimos de toxicidad B), shellac, ahumado y furfural. La resina es mejor aplicarla emulsionada, de modo que se reduzca su cantidad, aumente el oxígeno en la madera y así se produzca polimerización, reteniendo la resina y evitando la exude. El furfural es, en cuanto a resultados, uno de los tratamientos más eficaces [22] ya que reduce la humedad hasta en un 30%, mejora la durabilidad tanto frente a insectos como a hongos y aumenta la densidad. Es un derivado de subproductos de la agricultura: maíz, avena, trigo, aleurona y aserrín, pero su proceso requiere de autoclave para someter a la madera a alta presión para su absorción. Futuras líneas de investigación pueden encaminarse a estudiar un proceso menos industrial para la obtención de furfural y su aplicación mediante inmersión de la madera sin necesidad de autoclave, para ser empleado en zonas en desarrollo, así como el impacto ecológico de este proceso.

4. APLICACIÓN EN ZONAS EN DESARROLLO (GATLANG)

Gatlang es un poblado de Nepal que se vio afectado por el terremoto de 2015, por lo que diferentes organizaciones siguen a día de hoy colaborando en su reconstrucción. Concretamente Gatlang, está constituido por viviendas de madera, por lo que ello, sumado a la deforestación que se ha producido entorno al Himalaya, justifican la búsqueda de métodos económicos y de fácil aplicación para alargar la vida útil de la madera en esta zona.

En la zona de Gatlang predomina la madera Chir, rica en resina pero de durabilidad inferior a 60 meses. Es preferible la madera de Deodar (durabilidad superior a 120 meses), que contiene también una resina que protege la lignina de la madera. Ambas son maderas poco refractarias, esto es que son fáciles de tratar, pero necesitan ser secadas inmediatamente para que no desarrollen hongos de mancha azul [23].

Como mejoras se podría aplicar furfural si fuera viable; de forma más restrictiva en recursos el ahumado para aumentar la resistencia (de los ensayos se comprueba que la madera de cedrus deodara se encuentra en una categoría equivalente a C14 del código técnico español [24], que es la más baja); lacado o shellac (puede encontrarse en Sri Lanka) para proteger mejor su superficie de la humedad.

Conviene estudiar más a fondo los materiales autóctonos y sus posibles aplicaciones.

CONCLUSIONES

La madera tiene grandes ventajas como elemento estructural de viviendas debido a su bajo coste y altas propiedades resistentes y ecológicas. Para solventar sus carencias frente a la exposición ambiental se analizan diferentes tratamientos, resultando los más ecológicos y sencillos de obtener: laca, ahumado, shellac, resinas y aceites y furfural. Estos tratamientos pueden ser aplicados en el poblado de Gatlang, para alargar la vida de sus estructuras y luchar contra la deforestación.

AGRADECIMIENTOS

A mi cotutor del TFG P. Castilla por la información sobre Gatlang proporcionada, a mis padres y a Dios por su apoyo con el presente artículo durante la Semana Santa.

REFERENCIAS

[1] Young, J. F., Bentur, A., & Mindess, S. (1998). The science and technology of civil engineering materials.

[2] Lehmann, S. (2013). Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions. *Sustainable Cities and Society*, 6, 57-67.

- [3] Hildebrandt, J., Hagemann, N., & Thrän, D. (2017). The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in Europe. *Sustainable cities and society*, 34, 405-418.
- [4] Cohen, D. H., & Gaston, C. (2003). The use of engineered wood products in traditional Japanese wood house construction. *Wood and fiber science*, 35(1), 102-109.
- [5] Švajlenka, J., & Kozlovská, M. (2019). Effect of accumulation elements on the energy consumption of wood constructions. *Energy and Buildings*, 198, 160-169.
- [6] Fournier Zepeda, R. (2008). Sustainable and wood construction: realities, myths and opportunities. *TECNOLOGIA EN MARCHA*, 21(4), 92-101.
- [7] Unger, A., Schniewind, A. P., & Unger, W. (2001). Wood Properties. In *Conservation of Wood Artifacts* (pp. 23-42). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [8] Cui, W., & Kamdem, D. P. (2000). Wood products and wood protection in China. *European Journal of Wood and Wood Products*, 58(5), 387-391.
- [9] Hyvönen, A., Nelo, M., Piltonen, P., & Niinimäki, J. (2007). Using the emulsion technique and an iron catalyst to enhance the wood protection properties of tall oil. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 65(3), 247-249.
- [10] Hoeflaak, M., & Gard, W. F. (2001). Test methods for a reliable assessment of water-borne paints for exterior wood protection. *Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions*, 84(4), 259-262.
- [11] Mihăilă, A., Danu, M., Ibănescu, C., Anghel, I., Șofran, I. E., Balanescu, L. V., ... & Lisa, G. (2021). Thermal characterization and rheological behavior of some varnishes and paints used for wood protection. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-16.
- [12] Veronovski, N., Verhovšek, D., & Godnjavec, J. (2013). The influence of surface-treated nano-TiO₂ (rutile) incorporation in water-based acrylic coatings on wood protection. *Wood science and technology*, 47(2), 317-328.
- [13] Yona, A. M. C., Žigon, J., Matjaž, P., & Petrič, M. (2021). Potentials of silicate-based formulations for wood protection and improvement of mechanical properties: A review. *Wood Science and Technology*, 55(4), 887-918.
- [14] De Vetter, L., Depraetere, G., Stevens, M., Janssen, C., & Van Acker, J. (2009). Potential contribution of organosilicon compounds to reduced leaching of biocides in wood protection. *Annals of forest science*, 66(2), 1-7.
- [15] Schwarzkopf, M., Burnard, M., Tverezovskiy, V., Treu, A., Humar, M., & Kutnar, A. (2018). Utilisation of chemically modified lampante oil for wood protection. *European journal of wood and wood products*, 76(5), 1471-1482.
- [16] Sahoo, S. C., Sil, A., Thanigai, K., & Pandey, C. N. (2011). Use of silicone based coating for protection of wood materials and bamboo composites from weathering and UV degradation. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 8(2), 143-147.
- [17] Cappelletto, E., Maggini, S., Girardi, F., Bochicchio, G., Tessadri, B., & Di Maggio, R. (2013). Wood surface protection with different alkoxyxilanes: a hydrophobic barrier. *Cellulose*, 20(6), 3131-3141.
- [18] Remadevi, O. K., Siddiqui, M. Z., Nagaveni, H. C., Rao, M. V., Shiny, K. S., & Ramani, R. (2015). Efficacy of shellac-based varnishes for protection of wood against termite, borer and fungal attack. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 12(1), 9-14.
- [19] Bogdanova, V. V., Kobets, O. I., & Kirlitsa, V. P. (2016). The mechanism of action and the synergistic effect of nitrogen and phosphorus-containing fire retardants in fire protection and wood and peat fire suppression. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 10(2), 306-312.
- [20] Hadi, Y. S., Nurhayati, T., Jasni, J., Yamamoto, H., & Kamiya, N. (2010). Smoked wood as an alternative for wood protection against termites. *Forest Products Journal*, 60(6), 496-500.
- [21] Esteves, B., Nunes, L., & Pereira, H. (2011). Properties of furfurylated wood (*Pinus pinaster*). *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(4), 521-525.
- [22] Lande, S., Westin, M., & Schneider, M. H. (2004). Eco-efficient wood protection: Furfurylated wood as alternative to traditional wood preservation. *Management of Environmental Quality: An International Journal*.
- [23] Nepal Government (1194). National Building Code of Nepal 112 Timber.
- [24] Gobierno de España (2009). Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural en Madera.

METODOLOGÍA PARA LA PRIORIZACIÓN DE INTERVENCIONES EN REDES DE ABASTECIMIENTO DE PEQUEÑOS Y MEDIANOS MUNICIPIOS

Lucía Cabezas Sánchez¹

¹ Innovación e Investigación en Ingeniería Civil.
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Castilla-La Mancha.
Av. Camilo José Cela 2, 13071 Ciudad Real-España
* Persona de contacto: lucia.cabezas@alu.uclm.es

RESUMEN

Las actuaciones de intervención o renovación en redes de abastecimiento de municipios suelen responder a problemas “visibles”, como son los reventones de tuberías. Asimismo, la falta de conocimiento acerca del funcionamiento de las redes cuando estas se encuentran sometidas a distintos escenarios de demanda, y un envejecimiento progresivo de las mismas, desembocan en otros problemas que provocan una reducción progresiva de la calidad del servicio.

El presente trabajo propone una metodología para el análisis de las redes de abastecimiento que base la toma de decisiones en criterios técnicos, consiguiendo mejoras del funcionamiento en las mismas; no solo para priorizar actuaciones de intervención ineludibles a corto plazo, sino que sirva también como base técnica a tener en cuenta para las progresivas renovaciones en las infraestructuras de las redes a medio y largo plazo. Todo ello se ejemplificará con la sistemática adoptada en la red de abastecimiento del municipio de Villaescusa de Haro (Cuenca, España).

PALABRAS CLAVE: Abastecimiento, red, renovación, amianto.

ABSTRACT

Intervention or renovation actions in municipal water supply networks usually respond to "visible" problems, such as burst pipes. Likewise, the lack of knowledge about the functioning of the networks when they are subjected to different demand scenarios, and their progressive ageing, lead to other problems that cause a progressive reduction in the quality of the service.

This work proposes a methodology for the analysis of water supply networks that bases decision-making on technical criteria, achieving improvements in their operation; not only to prioritise unavoidable short-term intervention actions, but also to serve as a technical basis to be taken into account for the progressive renovation of the network infrastructures in medium and long term. This will be exemplified by the systematic adopted in the water supply network of the municipality of Villaescusa de Haro (Cuenca, Spain).

KEYWORDS: Supply, network, renovation, asbestos.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de abastecimiento se encuentran sometidas a una heterogeneidad de factores que impide el planteamiento de medidas homogéneas globalizadas, debiendo adaptarse a cada caso concreto. Entre estos factores destacan la evolución de la población y el tipo de actividades desarrolladas en el municipio, afectando ambos a las demandas a las que se ve sometida la red.

Las demandas que solicitan una red presentan a su vez variaciones temporales. Las más evidentes se dan de forma diaria, con un valle en las horas nocturnas y uno o varios picos que corresponden a los momentos de

máximo consumo. Además, pueden existir mayores periodos de variación, como pueden ser variaciones estacionales debidas a la presencia de una elevada población flotante. Esto obliga a coordinar la gestión de la infraestructura entre periodos donde se presenta un elevado consumo con respecto a periodos en los que el consumo disminuye debido a la única presencia de la población perenne.

Asimismo, el proceso de despoblación al que se encuentran sometidos muchos pequeños y medianos municipios en España genera una reducción progresiva de la capacidad técnica y financiera del mantenimiento del servicio [1] que desemboca a su vez en una merma

progresiva del estado de las redes. El envejecimiento de la infraestructura, o un inadecuado diseño se traduce en un aumento de las pérdidas [1].

Junto con ello, las dificultades de financiación de algunas localidades hacen que en ocasiones se posterguen las intervenciones sobre las redes para disminuir pérdidas o mejorar el funcionamiento general de la misma [2].

Es por todo ello que el presente artículo muestra una metodología de trabajo que permite afrontar la progresiva renovación de las redes de abastecimiento. La metodología se ejemplificará a partir del caso concreto desarrollado en [3].

2. INFORMACIÓN DE PARTIDA

El primer paso del desarrollo propuesto consiste en la recopilación de toda la información disponible acerca de los elementos de la red. Dispondrá de esta información la empresa encargada del mantenimiento y gestión de la infraestructura (que, en ocasiones, generalmente en pequeños municipios, es el propio Ayuntamiento de la localidad). Es necesario conocer, al menos:

- Trazado actual de la red, diámetros y materiales de todas las tuberías que conforman la red.
- Depósito/s: capacidad, elevación, función dentro del sistema (si son de cabecera, reguladores o de cola) y conexiones que presentan con el resto de la red.
- Sistema de bombeo: localización, curva característica, si el sistema se encuentra duplicado (en serie o en paralelo).
- Captaciones: tipo de captación, localización, volumen de extracción permitido. Además, debe constatarse si existen captaciones autorizadas por el Organismo de Cuenca competente que no se estén explotando.
- Tipos de válvulas presentes en la red.
- Intervenciones recientes: zonas de la red intervenidas, motivo de la intervención, características de las nuevas piezas instaladas.

Además, es ampliamente recomendable disponer de la siguiente información:

- Profundidad de soterración y espesor de cada tubería: En ocasiones es difícil disponer con detalle de esta información. Para la profundidad de soterración de las tuberías pueden suponerse valores medios. A ser posible, se consultará al fabricante el espesor de las conducciones. Si esto resulta inviable o imposible, se elegirán valores de acuerdo con la bibliografía disponible.
- Coordenadas de todas las válvulas de la red. En caso de no disponerse de esta información de partida, se ampliará en fases posteriores la información sobre las zonas de la red que se consideren de mayor interés.

3. DIGITALIZACIÓN Y GENERACIÓN DE UN MODELO

En caso de que la información descrita anteriormente no sea proporcionada en formato digital, se debe proceder a la georreferenciación y digitalización de la misma. Para

ello es necesario emplear un Sistema de Información Geográfica (SIG). Además, puede hacerse uso de un *plugin* que ayude a la creación y edición de los elementos de la red. Para el caso de la red de abastecimiento de Villaescusa de Haro se ha usado el *plugin* QEPANET, implementado por la Universidad de Trento y la Universidad Libre de Bozen-Bolzano (ambas en Italia), el cual permite acoplar las funciones de EPANET (*software* de simulación hidráulica) al SIG libre QGIS.

De la cartografía pública en formato digital se requiere un Modelo Digital del Terreno (MDT). Este se puede obtener del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Se recomienda optar por un MDT con paso de malla de 2 m -en caso de que exista para la zona de estudio-, o en su defecto el de menor paso de malla disponible. Este MDT será necesario para añadir a cada elemento del modelo su altitud.

3.1. Cálculo de las pérdidas de carga

En las redes a presión se dan dos tipos de pérdidas: Longitudinales y locales. Las primeras hacen referencia a las pérdidas de carga continuas debidas al recorrido del agua, mientras que las locales o localizadas se deben a cambios en la turbulencia producidos por cambios de dirección o sección, codos, estrechamientos, etc.

Entre las distintas formulaciones que permiten el cálculo de las pérdidas continuas, el uso de la formulación de Darcy-Weisbach se encuentra extendido a nivel mundial, y son numerosas las fuentes que recomiendan su uso puesto que es aplicable a todo tipo de regímenes [4].

Debido a la complejidad de calcular con precisión las pérdidas locales, éstas se pueden estimar proporcionales a las longitudinales, aumentando estas últimas un 10%.

La rugosidad absoluta (factor ϵ de Darcy-Weisbach) depende del tipo de material. Para la modelización de la red de abastecimiento de Villaescusa de Haro se tuvieron en cuenta los siguientes valores:

Tabla 1. Rugosidades absolutas empleadas en el modelo de la red de abastecimiento de Villaescusa de Haro [3].

Rugosidad absoluta (mm)		
Fibrocemento	PVC-U	Polietileno
3	0,02	0,03

4. IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMÁTICA

Una vez que se ha procedido a la digitalización de la red, y de forma previa a la simulación del modelo en distintos escenarios, se pueden identificar una serie de limitaciones sobre la propia red. Para ello se deben verificar lo siguiente:

- Porcentaje de conducciones sobre el total de la red formadas por fibrocemento: En lo que a materiales respecta, la Directiva 99/77/CE [5] prohibió a partir de 2005 el uso y comercialización de materiales que contienen amianto en toda la Unión Europea. Además, la elevada edad de estas conducciones las hace más susceptibles de sufrir roturas, con las asociadas pérdidas

de agua. La sustitución de las tuberías formadas por dicho material debe ser una prioridad frente a tuberías formadas otros materiales. En el caso de estudio de la red de Villaescusa de Haro, tras el análisis realizado se ha concluido que un 45,5% de las conducciones de la red son de fibrocemento [3].

- Configuración de la infraestructura: una red mallada permite que el agua llegue a un punto determinado siguiendo varios caminos, lo que puede permitir la reconducción del agua en caso de rotura o avería, haciendo que un menor número de usuarios notasen afección en el servicio durante el tiempo de resolución de la avería. En cambio, si la red presenta sectores ramificados, estos muestran el inconveniente de depender de la red situada aguas arriba.

- Puntos débiles o dependencias: relacionado con lo anterior, se debe hacer un análisis detallado de los cruces entre conducciones y conexiones que presenta la red, pues puede darse el caso de que algunas conducciones que son cruciales para el correcto funcionamiento de la red presenten un alto grado de debilidad.

En el caso de la red de Villaescusa de Haro, la captación de agua se realiza en un sondeo situado al noroeste de la localidad, y esta se transporta mediante una conducción cerrada hasta un depósito de cabecera. Desde allí, una única conducción directa (sin acometidas) transporta el agua hasta un depósito de regulación, situado en un enclave elevado en el centro del pueblo, a partir del cual se distribuye el agua hacia la totalidad de la red.

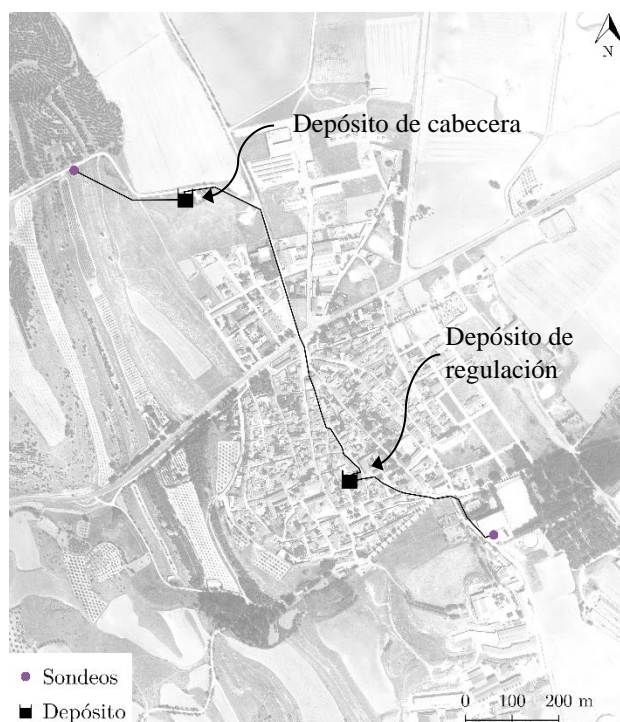


Figura 1. Localización de los sondeos, depósitos y conducciones directas de la red de abastecimiento de Villaescusa de Haro.

Fuente: [3].

Además, dicho depósito de regulación se encuentra conectado directamente con un sondeo emplazado al

sureste del pueblo, que cuenta con autorización para su explotación por parte del Organismo de Cuenca, pero que actualmente se mantiene cerrado.

Si se analiza la configuración actual, representada en la figura 1, resulta ineficiente el hecho de que el agua que será consumida en la zona norte de la localidad tenga que viajar desde el depósito de cabecera al de regulación, en vez de poder ser suministrada desde el primero.

Además de la ineficiencia de aumentar la distancia a recorrer por el agua -y, por ende, el aumento de las pérdidas-, se adiciona el hecho de la baja fiabilidad que transmite esta única conexión, pues una avería en ella podría llegar a afectar a la totalidad de la red.

Junto con las limitaciones que pueden ser percibidas simplemente analizando la configuración actual de la red, la simulación de la misma cuando se encuentra sometida a diversos escenarios de demandas resulta crucial para la priorización de actuaciones de intervención.

5. SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO EN DISTINTOS ESCENARIOS

El funcionamiento de una red de abastecimiento debe garantizar, de acuerdo con [6]:

- Que se satisfará la demanda estimada.
- Que operará a velocidades aceptables.
- Que operará dentro del rango de presión necesario.

Para ello, el análisis de funcionamiento de la red se realizará para al menos los escenarios:

- Situación de consumo máximo: A partir de datos registrados de consumo.
- Situación de consumo nulo: Donde se darán las mayores presiones.

Para poder realizar el análisis de la red en cuestión de la manera más fidedigna posible, se recomienda el empleo de datos de consumo diarios u horarios registrados por la empresa que realice la gestión de la red. Debe realizarse un análisis detallado de dicha información, para eliminar posibles días sin registro o con errores en la lectura. El mayor valor de la serie histórica será empleado (en caso de que la población no presente una tendencia constante-creciente), considerando el coeficiente punta correspondiente, para el escenario de máximo consumo. Junto con esto debe hacerse un análisis de la evolución de la población, pues si se detectase una tendencia constante-creciente en la misma, podría resultar necesario estimar la población a futuro y aumentar el consumo para la simulación de máximo consumo, con respecto a los datos registrados. Además, junto a las cifras oficiales recogidas por el Instituto Nacional de Estadística (INE) deben estimarse las máximas cifras de población flotante que se pueden dar simultáneamente en la población.

Para el estudio realizado sobre la red de Villaescusa de Haro, se disponía de los datos de consumo entre 2017 y

2020, y el análisis de población marca una clara tendencia decreciente [3].

5.1. Situación de consumo máximo

En caso de que fuese inviable disponer de datos de consumo, o esta serie no fuese lo suficientemente robusta como para basar el análisis en la situación de máximo consumo, se recurriría a realizar una estimación en base a la población máxima que se daría simultáneamente en la población (habitantes censados y no censados), empleando para ello una dotación tipo teórica, y un coeficiente punta teórico. La distribución de demandas se realizará mediante áreas de influencia, empleando por ejemplo secciones censales o polígonos de Voronoi, considerando la parcelación existente en la localidad. Para ello se hará uso del parcelario urbano o subparcelas urbanas, proporcionado por el Catastro o por el CNIG.

Puesto que esta situación produce las menores presiones en la red, debe prestarse especial atención a aquellos puntos en los que la presión pueda disminuir hasta valores anormalmente bajos.

5.2. Situación de consumo nulo

Este escenario define las mayores presiones que se van a dar simultáneamente en la red, conocidas como estáticas.

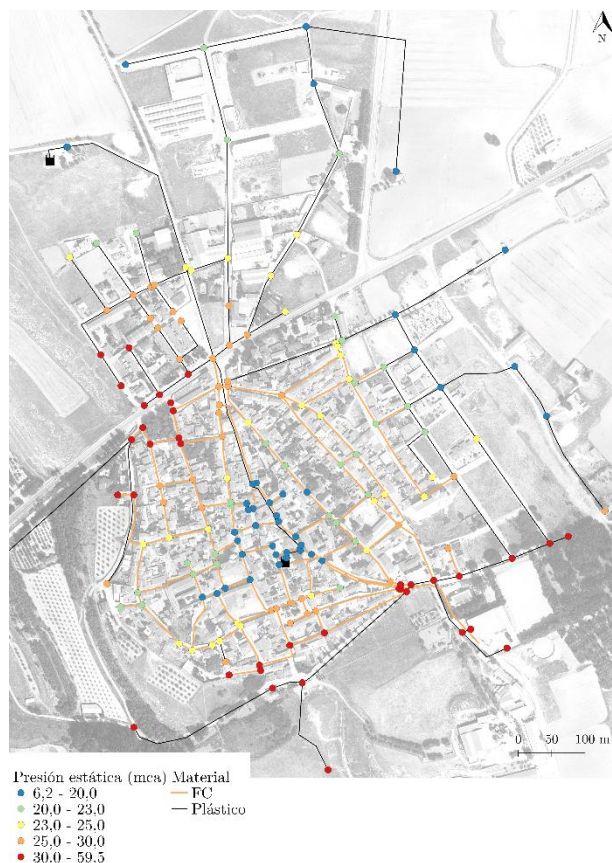


Figura 2. Presiones estáticas de la red en la situación de máximo consumo, junto con las conducciones (FC- fibrocemento). Fuente: [3].

6. PRIORIZACIÓN DE ACTUACIONES

La figura 2 muestra discretizados por cuantiles las presiones estáticas alcanzadas en los diversos nodos del modelo de la red de Villaescusa de Haro.

Si se relacionan las zonas que presentan mayor presión estática con aquellas conducciones que presentan un mayor grado de envejecimiento (las de fibrocemento, en color amarillento en la figura 2) se pueden identificar aquellos sectores donde potencialmente más pérdidas se van a producir. Es por ello que en aquellos sectores en los que las conducciones presentan un mayor riesgo de rotura debe priorizarse la intervención, debido a la combinación de las altas presiones estáticas a las que se pueden ver sometidas y a la avanzada edad de las tuberías.

7. ELECCIÓN DE NUEVAS CONDUCCIONES

La elección del material y diámetro de las conducciones a sustituir se hará de acuerdo con la disponibilidad del mercado y bajo el criterio del proyectista.

Con el objeto de optimizar los diámetros de las nuevas conducciones a instalar, se recomienda la aplicación del modelo matemático desarrollado en [7]. Este se basa en una función de costes formulada de manera potencial, ajustando los parámetros por mínimos cuadrados ordinarios, aplicando un sistema de restricciones con penalización.

REFERENCIAS

- [1] García Rubio Miguel A., González Gómez, F. (2020). Informe sobre el ciclo integral del agua en pequeños y medianos municipios. Libro verde de la gobernanza del agua en España.
- [2] González Gómez, F., García Rubio, Miguel A., Guardiola, J. (2011). Why is non-revenue water so high in so many cities?. Water Resources Development, (02), 345-360.
- [3] Cabezas Sánchez, L. (2021). Trabajo Fin de Grado: Análisis y mejora de la red de abastecimiento de Villaescusa de Haro. Universidad de Castilla-La Mancha.
- [4] Brown, G. O. (2003). The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance. Environmental and water resources history pp. 34-43.
- [5] Directiva 99/77/CE.
- [6] Norma UNE-EN 805:2000 Abastecimiento de agua.
- [7] Aragonés, D. et al. (2021). A heuristic algorithm for optimal cost design of gravity-fed water distribution networks. a real case study. Applied Mathematical Modelling. 95. 379-395. 10. 1016 /j.apm. 2021.02.015.

THE USE OF RECLAIMED ASPHALTIC PAVEMENT (RAP) ON HIGHWAYS SCHEMES

C. Coronado Garcia - Cuevas¹

¹ Civil Engineering Department. Castilla – La Mancha University.
Camilo Jose Cela Avenue, 13071 Ciudad Real – Spain

* Contact: carmenmaria.coronado@alu.uclm.es

ABSTRACT

Transport is the second largest consumer of energy and raw materials and a major emitter of greenhouse gases. To improve environmental quality and sustainable, transport agencies promote sustainable development and the transition to a circular economy model, where waste and end-of-life by-products are incorporated into the production cycle.

One of the most frequently used waste materials in pavement construction and rehabilitation is reclaimed asphalt pavement (RAP). RAP is a material 100% recyclable that can be re-introduced into another cycle without downgrading its functionality.

Whilst there are several drivers for the use of RAP in asphalt pavements, the two main factors are economic savings and environmental benefits.

Therefore, the main aim of this study is to give an overview of the existing techniques to use RAP in pavement construction and rehabilitation schemes, and their main benefits. In addition, the current legislation and the use of RAP for road base and sub-base applications in SPAIN will be analysed.

KEYWORDS: Pavement, Base, Sub-base, reuse, recycle, Recycled Asphalt Pavement, RAP, bituminous.

1. INTRODUCTION

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) refers to the removed and/or processed pavement material which contains asphalt and aggregates. These materials are typically generated when demolishing flexible pavements, resurfacing, digging out to reach buried utilities or as a result from surplus production.

The term ‘reclaimed’ leads to further discussion, distinguishing between “reuse” and “recycle”. The main difference between them is that the recycling involves reprocessing and considerable transportation. Also, a it can often originate from outside the project limits before use on the project, whereas reused material does not [6].

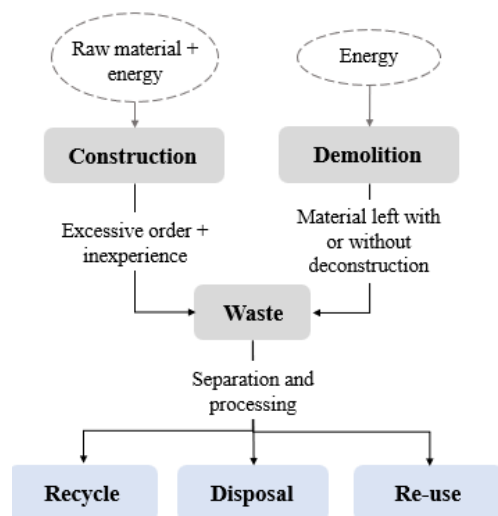


Figure 1. Life cycle of construction materials from raw stable materials to end-use

Local specifications establish the amount of RAP that can be used in a mixture. This amount is directly related to the quality of the aggregates in the RAP and the traffic level.

Table 1. Allowance of RAP use by Transportation Agencies in the US and Abroad

Transportation Agency of	Use	Limit (% by weight)
Florida	Non-traffic base applications (paved shoulders and bike paths)	100 %
France	Granular base materials	30 %
Germany	HMA layers	30 %
Minnesota	Granular base Sub-base	3.5 % 3 %
New York State	Sub-base	95 %
Texas	Flexible bases	20 %
Netherlands	Base asphalt pavements	100 %
United Kingdom	Sub-base	50 %
Washington	Base	20 %

2. PAVEMENT REUSE METHODS

RAP is typically generated from milling, full-depth pavement removal and waste HMA materials generated at the plant [17]. Other elements (such as rejuvenating agents, new bituminous mix, etc.) are added to these

materials to create consistent final material that meets the standards and can be used in asphalt mixtures.

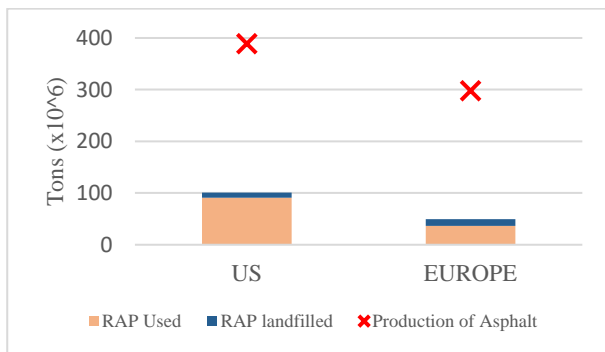


Figure 2. Comparison of RAP usage in US and Europe

Pavement reuse methods are broadly classified into central plant recycling and in-situ recycling. They might be further classified as hot or cold recycling, depending on whether heat is applied or not.

When selecting a reuse method, factors such as structural strength, pavement distress, required equipment, maintenance cost and effect on traffic flow are taken into consideration. Some of the most common methods of pavement reuse are briefly described below.

Central plant recycling

- Hot Mix Asphalt Recycling (HMAR)

"Hot Mix Asphalt Recycling" is understood as the process by which materials recovered from deteriorated bituminous layers or new mixtures that have not been used as a surplus or have not complied with the project specifications are mixed with virgin aggregate, new bitumen and / or rejuvenating agents, in the appropriate proportions, to produce new hot mixtures that meet the quality, strength and durability requirements required for the type of layer in which they will be used [18].

HMRA mixtures typically require the incorporation of 10-30% of RAP materials.

- Cold Center Plant Recycling (CCPR)

The recycled materials from milling are physically reduced to the required sized and blended with emulsions. Once the process in the plant is completed, the material is transported and placed on site with conventional machinery. The downside is that when bitumen emulsion or cement is used, the curing time depends on the climatic conditions of the location where the material is placed.

This method is usually used for rehabilitating roads with lower traffic volume and when Cold in-situ Recycle is not feasible.

In situ recycling

- Hot In-Place Recycling (HIP)

This technique involves heating, softening and milling the existing bituminous material. Among the equipment needed for this treatment is the scarifier or milling heater, along with infrared panels capable of raising the temperature of the pavement between 120 °C – 160 °C to facilitate the disintegration of the material.

Benefits of hot in-place recycling include correction of rutting, shoves and bumps; modification of aggregate gradation and asphalt content; elimination of surface cracks; lower hauling costs; and minimal traffic interruption [23].

- Cold In-Place Recycling (CIP)

Unlike the previous technique, this method does not require heat application.

This method is carried out on site with specific multifunctional equipment that sizes the RAP, pulverizing the existing pavement and blends it with Portland cement, quick-lime or fly ash additives.

The benefits of cold in-place recycling include the ability to widen pavement, minimum hauling and air pollution, good structural treatment of most pavement problems and better ride quality [24]. This entails less loading and hauling during the entire recycling process since all work will be carried out at the same place without having to move around [25].

CIR mixtures have to be cured for a long period of time to increase its strength. Thus, this method is not recommended for rehabilitation projects which have the time as a constraint. The overall CIR process is dependent on ambient temperature and moisture conditions [25].

3. ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC IMPACT

Environmental considerations

Using RAP to produce bituminous mixes can result in up to 23% energy savings [16]. In addition, this technique leads to lesser use of virgin material along with reduced fuel consumption up to 35% due to lower production temperatures [16]. The decreased fuel consumption also lowers the fumes and greenhouse gas emissions produced during asphalt production, making it more environmentally friendly.

Nevertheless, there are potential contamination issues related to the use of RAP. Before using RAP to produce bituminous mixes, it is necessary to analyse the possible presence in their composition of elements that are

potentially environmentally hazardous. Contaminants of concern for RAP are primarily related to pH, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), and a variety of metals, including aluminium, lead, silver, selenium, cadmium and chromium.

Besides, it has to be mentioned that central plant recycling might generate gas emission pollution.

Economic implications

Using RAP leads to cost savings that are attributed either to the reduction in virgin material cost and/or transportation cost. These savings vary depending on the type and percentage of RAP used, with a greater percentage leading to lower construction costs.

On the other hand, according to the ‘polluter pays’ principle, increasing fees have to be paid for the disposal of bituminous materials at landfills. Using RAP decreases the amount of waste materials disposed to landfill, thus producing great economic savings.

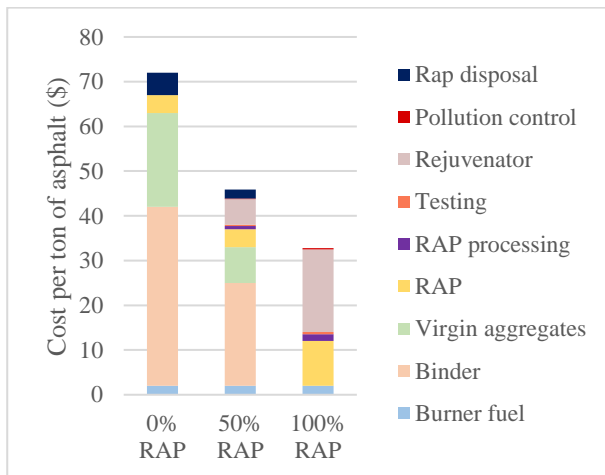


Figure 3. Hot Mix Asphalt (HMA) cost based on RAP content. Data source [26]

4. CASE STUDY: BURGOS MOTORWAY (SPAIN)

Spain has over 30 years of experience in the recycling and management of RAP.

From the beginning of the 21st century, the recycling of asphalt mixes experienced a new rise due, on the one hand, to the recommendations of the Administration with the drafting of Circular OC 8/2001, relating to the reuse of RAP on the State Road network and, on the other hand, to the technological advances made by manufacturers of asphalt mix plants.

This regulation was revised and updated in 2017, allowing for higher percentages of RAP.

According to the updated specifications in Spain, up to 60% RAP can be used for the production of bituminous

mixes for base and intermediate layers, in compliance with the specifications in force (article 22 of the PG4). More than 60% of RAP is also possible, however, in this case, the explicit authorization of ‘Dirección General de Carreteras’ will be required.

The use of RAP as an aggregate layer, together with that of backfill, is probably the most common use of RAP at present. However, there are many experiences carried out using RAP in bases and sub-bases. An example of the former is discussed below.

Arlazón (Burgos) motorway

RAP to be used in this project came from a layer of AC16 D milled from a section of the Nacional I.

The ‘Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento’ approved the construction of a first experimental section within the concession of the A1 motorway works in Burgos, managed by Sacyr, in which 100% RAP would be used to obtain a layer of AC16 D 50/70.

According to the criteria set out in section 7.4 of Standard 6.3-IC for cold in-situ recycling, for the applicable traffic category (T2), the cold in-situ recycled mix can be placed on the carriageway, providing it has a wearing course on top of it. Therefore, the standard section of the experimental pavement section consists of a 5 cm milling of the existing pavement, a replacement with the cold in-place cold recycled material, and the subsequent placing of a wearing course with conventional bituminous mix.

The results obtained from tests on samples collected on site can be consulted in [20]. These results show optimum values for Indirect Tensile Strength, Stiffness Modulus Test and Water Sensitivity.

After two years in service, the experimental section has performed very well without any signs of deformation or other pathologies.

5. CONCLUSIONS

The reuse of material from pavement milling is not only an environmental issue, but there are also technical, economic and social reasons for it.

With respect to the scope of application, despite the significant increase in the use of RAP as a building material, there are some countries are not able to fully adopt RAP methods due to lack of knowledge and expertise.

Based on the discussed, it is obvious that RAP methods reduce maintenance costs as well as environmental impact since these methods used recycled asphalt pavement, which also contributes to reduce wastes.

Previous studies have stated that Cold in-situ recycling (CIR) is the most widely used method in refurbishment and construction works. This is because the entire recycling process is carried out on site and therefore consumes less energy, emits less greenhouse gases and is more cost-effective compared to other methods. According to Murphy and Emery [25], the use of CIR method is able to reduce the cost of milling, strengthen the granular base, and recycle the existing asphalt by 30-60%. Thus, this method is not recommended for rehabilitation projects which have a time constraint.

It should be borne in mind that if the RAP comes from wearing courses or binder courses, the component materials are of a higher quality. Thus, it would be desirable to reuse them in layers with the same purpose in order to exploit the value of the materials. For instance, if the milled material from a wearing course is used in recycled mixes for base courses, the higher quality of the aggregates would be wasted.

Lastly, along the same lines of recycling and saving raw materials, there are many studies that analyse the performance of the bituminous mix obtained by adding other recycled elements such as fly ash, scrap tires, foundry sands, and plastic waste to the traditional mix. The results of these studies may lead to new techniques that will be used in the near future for highways schemes.

REFERENCES

- [1] Y. Zhao, D. Goulias, D. Peterson. Recycled Asphalt Pavement Materials in Transport Pavement Infrastructure: Sustainability Analysis & Metrics. *Sustainability* (2021). 13, 8071.
- [2] S. Pourkhorshidi, C. Sangiorgi, D. Torreggiani, P. Tassinari. Using Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Unbound Layers of Pavements. *Sustainability* (2020). 12, 9386.
- [3] P. Mondschein. Reuse of Reclaimed Material in Road Construction Layers. *Slovak Journal of Civil Engineering* (2018). Vol 26, No.2, 40-44.
- [4] V. Antunes, J. Neves, A.C. Freire. Performance Assessment of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Road Surface Mixtures. *Recycling* (2021). 6, 32.
- [5] Reciclado de Pavimentos Asfálticos. Ficha Técnica CEDEX. (2011).
- [6] Pavement Reuse. *Greenroads Manual v1.5*. (2011). MR-2.
- [7] A. Raouf, E. Sukhdeep. Use of Recycled Materials in Pavement Construction. CT University (2018). Volume 5, Issue 8.
- [9] U. Naulkha, E. Aman. A Review Study on Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Materials in Flexible Pavements. *GEV Panipat* (2018). Volume 3, Issue 6.
- [10] S.J. Chavarro. High Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Asphalt Mixtures for Low Volume Roads. PhD Thesis. Texas A&M University. (2018)
- [11] M. Abukhattala. Use of Recycled Materials in Road Construction. 2nd International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering (2016). Ottawa, Canada. Paper No. 138.
- [12] T. Pradyumma, A. Mittal, P.k. Jain. Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for use in Bituminous Road Construction. 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2013). India.
- [13] X. Planas. Analysis of the use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Europe. PhD Thesis. Politecnico di Milano. (2016).
- [14] H. Soleymani. Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Under Superpave Specifications: A Regional Pooled Fund Project. Purdue University (2002).
- [15] E. Hoppe, S. Lane, S. Shetty. Feasibility of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Use As Road Base and Subbase Material. Virginia Center for Transportation Innovation and Research (2015).
- [16] M. Adnan, M. Shafi. Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements: A Review. *Innov. Ingrastruct. Solut.* (2017). 2:10.
- [17] P- Stephanos, J. Pagán-Ortiz. Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration (2011).
- [18] A. Milad, A. Mohd, A. Ahmeda, M. Solla, N. Izzi. A Review of the Use of Reclaimed Asphalt Pavement for Road Pavement Applications. *Jurnal Teknologi* (2020).
- [19] Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. Proyecto GEAR (2018).
- [20] Revista Asfalto y Pavimentación. Número 25. Volumen VII. Segundo trimestre (2017).
- [21] F. Miranda, J.P. Aguiar. Mezclas Asfálticas con RAP: Pavimentos Asfálticos Reciclados. *Boletín Técnico PITRO – LANammeUCR*. Volumen 10, N° 1. 2019.
- [22] Orden Circular 40/2017 sobre Reciclado de Firmes y Pavimentos Bituminosos. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. (2017).
- [23] I. Al-Qadi, H. Ozer, J. Harvey. Pavement Life-cycle Assessment. Proceedings of the Symposium on Life-Cycle Assessment of Pavements. *Pavement LCA* (2017).
- [24] A. Salomon, D. Newcomb. Cold In-place Recycling Literature Review and Preliminary Mixture Design Procedure. (2000).
- [25] D. Murphy. J. Emery. Modified Cold In-place Asphalt Recycling. *Road Construction, Rehabilitation and Maintenance* (2000). 143-150.
- [26] M. Zaumanis, R- Mallick, R. Frank. 100% Recycled hot mix asphalt: A review and analysis. (2014), 92, 230-245.

GREEN CONCRETE: BUILDING IN A MODERN AND ECOLOGICAL WAY

Hugo Alejandro Bohorquez Aliaga

"Innovation in Civil Engineering"

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Castilla – La Mancha

Avenida Camilo José Cela s / n, 13071. Ciudad Real - Spain

Contact email: HugoAlejandro.Bohorquez@alu.uclm.es

RESUMEN

En la última década se han ido desarrollando varias innovaciones sobre todo en la industria del hormigón con la finalidad de garantizar su sostenibilidad así como sus iniciativas ecológicas, esto es debido a que la producción masiva de miles de millones de toneladas de hormigón para satisfacer la demanda de infraestructura civil ha supuesto un gran problema para los depósitos naturales de materia prima generando de este modo la necesidad de considerar nuevas alternativas para continuar con la producción del hormigón. El presente trabajo es un artículo de investigación sobre el uso del hormigón verde dando a conocer sus características fundamentales así como las innovaciones recientes que se han desarrollado a través de los años para lograr de esta manera un hormigón más ecológico con propiedades mejoradas y usando nuevos materiales respecto a un hormigón tradicional.

PALABRAS CLAVE: Hormigón verde, sostenibilidad, Eco-cemento

ABSTRACT

In the last decade, several innovations have been developed, especially in the concrete industry in order to guarantee its sustainability as well as its ecological initiatives, due to the fact that the massive production of billions of tons of concrete to satisfy the demand for infrastructure construction has been a major problem for the natural deposits of raw material, thus giving rise to the need to consider new alternatives to continue with the production of concrete. The present work is a research article on the use of green concrete, revealing its fundamental characteristics as well as the recent innovations that have been developed over the years to achieve in this way a more ecological concrete with improved properties and using new respect. to traditional concrete.

KEYWORDS: Green Concrete, sustainability, Eco-cement

INTRODUCCIÓN

La economía de cualquier país crece en base a la infraestructura disponible; dicha infraestructura aborda carreteras, puentes, edificios, almacenes, aeropuertos, puertos, etc. A medida que va creciendo la demanda de infraestructura, crece la necesidad del hormigón, lo que por ende conduce a la demanda de más cemento [1].

El hormigón es más sostenible en términos de energía consumida así como emisión de carbono por volumen en comparación con otros materiales de construcción como el acero. Sin embargo, tiene una alta demanda con respecto a otros materiales en la industria de la construcción y, al mismo tiempo, es una preocupación ambiental, ya que produce gases peligrosos en varias etapas de producción eliminando así su ventaja sostenible. La producción de cemento portland ordinario – Ordinary Portland Cement (OPC), que es el principal aglutinante del hormigón, contribuye en

aproximadamente un 8 % a las emisiones antropogénicas de carbono del mundo y utiliza aproximadamente un 3 % de la energía mundial como se presenta en la Fig. 1. [1]. Además, la industria del hormigón es el mayor consumidor de áridos naturales y agua dulce; por lo que ante una mayor producción de hormigón para uso futuro conducirá a un agotamiento significativo de estos recursos naturales y por lo tanto a la contaminación del ambiente. Por lo tanto, la necesidad de contar con hormigón verde es fundamental para satisfacer las demandas futuras de hormigón mientras se conservan los recursos naturales. El hormigón verde se puede clasificar como cualquier hormigón que tiene menos energía incorporada y carbono en comparación con el hormigón OPC convencional incorporando esencialmente diferentes materiales de desecho como aglutinante y/o árido [2].



Fig. 1. Producción mundial de cemento de 1995 a 2020, en miles de millones de toneladas métricas.

CARACTERISITCAS Y USOS DEL HORMIGÓN VERDE

El desarrollo del hormigón verde fuerte y duradero se basa en el concepto que puede resistir la carga y diversas fuerzas perjudiciales en el ambiente. Las perspectivas del hormigón verde para producir excelentes propiedades frescas y endurecidas en comparación con el hormigón OPC convencional garantizarán un bajo costo de mantenimiento, una finalización rápida de las construcciones y una vida útil prolongada. Se discute el uso de diferentes componentes alternativos para producir hormigón verde junto con sus efectos resultantes sobre las propiedades del mismo. Se espera que este artículo sirva como guía para las partes interesadas en la industria de la construcción que buscan mejorar la sustentabilidad del hormigón [2].

Al querer desarrollar hormigones verdes que tuvieran resistencias a la compresión como en la Fig. 2. además de una considerable durabilidad (es decir, resistencia a la penetración del agua) similares a las del hormigón convencional se logró teniendo en cuenta los resultados de las pruebas que se realizaron en el laboratorio en la Tabla 1. Se encontró que todas las propiedades de los hormigones se basaron en los resultados obtenidos en el estudio piloto, que deben confirmarse posteriormente en la práctica, cuando los hormigones verdes se utilicen realmente para la construcción. Se utilizaron tres tipos diferentes de subproductos industriales para preparar los hormigones verdes. La arena de fundición es un material de desecho producido por una gran fundición ferrosa (Cimos, Maribor); consiste en arena de sílice que se une con resina fenólica. La escoria de acero (EAF S) que es un subproducto que se produce durante la fabricación de aceros inoxidables o aceros de alta aleación en varios procesos metalúrgicos (por ejemplo, hornos de arco eléctrico, convertidores y cucharas). Las cenizas volantes se originan en los procesos de combustión del carbón, que tienen lugar en una central termoeléctrica. Corresponde a la Clase F según la norma ASTM 618. El uso de cenizas volantes en las mezclas de hormigón como sustituto parcial del cemento Portland es una práctica bastante común ya que incluso puede mejorar la resistencia y durabilidad del hormigón, y son también algunos beneficios económicos [3].

Todos los materiales mencionados anteriormente, que se utilizan en la producción de hormigón, cumplen el requisito de que su contenido en contaminantes sea relativamente bajo (todos ellos no son peligrosos, excepto los residuos de construcción y demolición, que son inertes) y que los componentes tóxicos están inmovilizados en la matriz del cemento, por lo que la posibilidad de que se filtren al ambiente es insignificante. Además, estos materiales alternativos también cumplen los requisitos nacionales en cuanto a rendimiento técnico y durabilidad ya que la necesidad de contar con hormigón que sea fuerte y duradero ha impulsado el desarrollo de hormigón verde que puede resistir la carga y diversas fuerzas perjudiciales en el ambiente [3].

Tabla 1.

Propiedades frescas y endurecidas (a los 28 días) de hormigones verdes convencionales y distintos, medidas en laboratorio

Hormigón	Relación a/c Calculada	Consistencia (slump) EN 12350-2:2009	Esfuerzo de Compresión (MPa) EN 12390-3:2009	Penetración del Agua (mm) EN 12390-8:2009
Hormigón convencional	0.58	205	43.2	16
Hormigón verde a base de cenizas volantes	0.75	195	43.4	22
Hormigón verde a base de arena de fundición	0.56	210	30.1	19
Hormigón verde a base de escoria de acería	0.48	205	37.4	21
Hormigón reciclado a base de árido reciclado	0.64	200	45.3	18
Hormigón verde a base de árido reciclados y cenizas volantes	0.81	185	35.5	25
Hormigón verde a base de árido reciclado y arena de fundición	0.74	210	34.3	34
Hormigón verde a base de árido reciclados y escorias siderúrgicas	0.61	200	40.1	19

Fuente: Environmental evaluation of green concretes versus [3]

El impacto ambiental del hormigón reciclado (en el que parte del árido natural se reemplaza por árido reciclado obtenido a partir de residuos de hormigón) se reduce a alrededor del 88% (pero solo al 96% con respecto a las emisiones de CO₂, es decir, Calentamiento Global) de los impactos del hormigón convencional correspondiente [3].

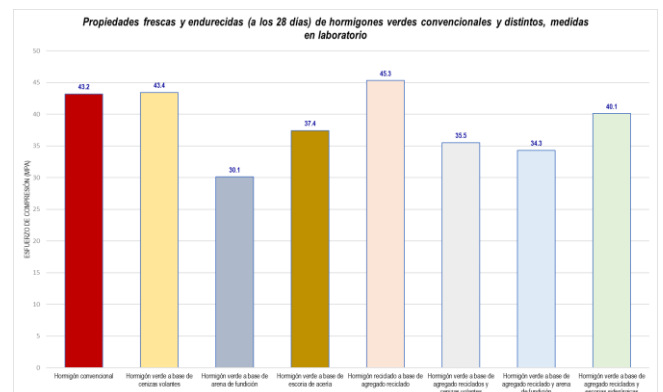


Fig. 2. Propiedades frescas y endurecidas (a los 28 días) de hormigones verdes convencionales y distintos, medidas en laboratorio.

Debido a las escasas posibilidades de calcular la huella de carbono total (conjunto total de emisiones de gases de efecto invernadero causadas por una organización, evento, producto o persona) para diversos tipos de cementos y hormigones por la enorme cantidad de datos que deben incluirse para hacerlo con precisión, existen grandes posibilidades para comparar los datos y la potencialidad de la reducción del dióxido de carbono (CO₂) debido a la vida útil completa del material, suponiendo que las propiedades bien conocidas de los hormigones geopoliméricos puedan resistir más tiempo de la misma expansión corrosiva en comparación con los hormigones Portland. Debido a esto, aumenta la vida útil de la estructura en la que se utiliza hormigón verde [4].

a) Comportamiento mecánico del hormigón verde producido con áridos de residuos de carbón sin tratar: Se ha tratado de encontrar formas de reducir los efectos negativos de los desechos de carbón sin tratar (UCW - Untreated coal wastes) en el ecosistema de la región. Sin embargo, el reciclaje de dichos residuos puede identificarse como una solución práctica en la producción de áridos de hormigón por lo que se prepararon un total de once diseños de mezcla con diferentes contenidos de residuos de carbón sin tratar como áridos para luego determinar las resistencias a la compresión, tracción y flexión del cubo, cilindro y prisma, así como el módulo de elasticidad de las muestras. Los resultados revelaron que las partículas de residuos de carbón sin tratar pueden potencialmente reutilizarse en la fabricación de áridos de hormigón. Se confirmó que la selección de una cantidad adecuada de reemplazo puede contribuir a la mejora de las propiedades del hormigón, lo que también sugiere una solución medioambiental para reducir los residuos de carbón sin tratar. Por lo tanto, reemplazando el 5% del árido con desechos de carbón sin tratar en lugar de arena y grava, las propiedades mecánicas aumentaron. En promedio, en el reemplazo de arena y grava, la resistencia a la compresión y a la flexión aumentó entre un 3% y un 7% y entre un 5% y un 8%, respectivamente [5].

b) Mezcla de Hormigón Verde utilizando residuos sólidos y nanopartículas como alternativas: Los materiales de desecho de la agricultura, industrias, desechos biológicos, marinos y los electrónicos se pueden reciclar además de utilizarse como materiales de hormigón verde complementario reduciendo de esta forma el impacto ambiental de la producción de OPC y el consumo de energía. La aplicación de la nanotecnología para un edificio verde en el presente y el futuro es muy significativa debido a que las estructuras de hormigón preparadas a partir de materiales de desecho tienen un menor impacto ambiental a través de la reducción de las emisiones de CO₂ y mantienen todas las especificaciones de "hormigón verde". Se ha sugerido que estos materiales de desecho se agreguen como un sustituto en las estructuras de hormigón como aditivo para obtener una mejor trabajabilidad, resistencia y durabilidad. Otro hallazgo importante fue utilizar las nanopartículas para fabricar hormigón verde y lograr un

hormigón de alto rendimiento mediante la reducción del uso de recursos naturales y la emisión de gases de efecto invernadero (CO₂), para estos materiales de construcción económicos y respetuosos con el medio ambiente. Las industrias de fabricación de cemento pueden comprar a proveedores (comerciantes de chatarra) los materiales de desecho que desean incorporar y sustituir en su proceso de fabricación además que las personas pueden generar ingresos vendiendo estos materiales de desecho para las industrias de la construcción y reducir el calentamiento global [6].

c) Hormigón verde elaborado a partir de residuos de RSUI derivados de eco-cemento y áridos de cenizas de fondo: La incineración de residuos sólidos urbanos (RSUI) ha sido reconocida como un tratamiento eficaz para reducir el volumen de RSU, al mismo tiempo que se genera energía. Sin embargo, la eliminación de los residuos de la incineración se convierte en un desafío, especialmente para países con espacio limitado para vertederos. El hormigón verde compuesto por cenizas gruesas de fondo como áridos y eco-cemento como aglutinante, este último derivado exclusivamente de residuos de incineración clinkerizados a la temperatura de incineración (1100 °C) donde sus principales fases reactivas del eco-cemento fueron la cloro-alestadita y la velita, poseían propiedades de carbonatación y comportamiento de hidratación, para luego activarlo mediante el curado por carbonatación acelerando la ganancia de resistencia y facilitar el secuestro de dióxido de carbono, por lo que se usaron pruebas integrales de evaluación ambiental para validar el uso seguro de eco-cemento y hormigón verde. Este trabajo había demostrado el potencial de lograr una incineración sin residuos a través de la producción de hormigón verde, donde todos los residuos, incluidos el calor de la incineración y el dióxido de carbono de los gases de combustión, se aprovecharon al máximo. La viabilidad de utilizar todos los residuos de RSUI en un producto de hormigón verde, en el que tanto el aglomerante como el árido se derivaron casi en su totalidad de residuos. El clinker de eco-cemento a 800 – 1100 °C, que en el rango de calor operativo del incinerador, está por convertirse en un incinerador de producción de hormigón verde de circuito cerrado sin generación de residuos. No solo se pueden reciclar todos los residuos, sino que también se puede utilizar la energía térmica disponible localmente y el dióxido de carbono recogido de la chimenea [7].

d) Producción de hormigón verde y sostenible utilizando residuos de fibras de alfombras y cenizas de combustible de aceite de palma: La utilización de residuos industriales en la producción de materiales de construcción sostenibles ha llamado mucho la atención debido al ahorro de un lugar necesario para los vertederos, el bajo costo de los materiales de desecho así como una mejora en las propiedades del hormigón. Este estudio presenta los resultados de un trabajo de investigación que aborda las propiedades físicas y mecánicas del hormigón verde que comprende desechos

de fibra de alfombra de polipropileno y cenizas de combustible de aceite de palma (POFA). En este estudio, se usaron seis fracciones de volumen de fibra de 0–1.25% con fibras de 20 mm de longitud para mezclas de hormigón de cemento Portland ordinario (OPC). Se lanzaron otras seis mezclas, en las que el 20 % de POFA reemplazó al OPC. Se encontró que las fibras de alfombra, junto con POFA, reducen la trabajabilidad de los hormigones. Los resultados experimentales también revelaron que la combinación de desechos de fibras de alfombra y POFA mejoró la resistencia a la compresión a largo plazo del hormigón. A los 365 días, la resistencia a la compresión estaba en el rango de 43 a 54 MPa debido a la combinación de desechos de fibra de alfombra y POFA, por lo tanto, se incrementó la resistencia a la tracción y la flexión del hormigón; además que los efectos de POFA en la ganancia de resistencia del hormigón llegarían a ser más notorios en las edades finales de curado. Finalmente los resultados de este estudio mostraron que existe un futuro prometedor para el consumo de residuos de fibras de alfombras industriales junto con POFA en la producción de hormigón verde como componentes estructurales [8].

CONCLUSIONES

En este artículo se realizó una revisión a los recientes desarrollos e innovaciones en el campo del hormigón verde. Se puede deducir además que tanto la producción del hormigón verde es importante no solo porque es beneficiosa para crear una infraestructura sostenible y resiliente, sino también porque ayudará a satisfacer un futuro incremento en la demanda del hormigón, lo que conllevará a un mayor desarrollo y urbanización.

- 1) El hormigón verde ofrece un flujo sostenible tanto para satisfacer la demanda futura de hormigón así como proporcionar un material de construcción resistente y duradero para los requisitos de diseño futuros; además de proporciona una fuente más económica de material de construcción que impulsará un mayor desarrollo.
- 2) A medida que los materiales de desecho se incorporan efectivamente al hormigón verde, el hormigón verde ofrece una vía para el manejo de los materiales de desecho que podrían haber causado efectos perjudiciales en el medio ambiente debido a su eliminación inadecuada. Además, el aprovechamiento de estos residuos en hormigón conserva los espacios de terreno en los que habrán sido dispuestos.
- 3) Más investigación en este campo, junto con el desarrollo de estándares para el hormigón verde, incrementará la confianza de los interesados en la construcción en este material. Lo que conducirá eventualmente a una mayor aplicación de hormigón verde para diferentes infraestructuras.

REFERENCIAS

- [1] V. Vishwakarma and D. Ramachandran, “Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives – A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 162. Elsevier Ltd, pp. 96–103, Feb. 20, 2018. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.174.
- [2] A. Sivakrishna, A. Adesina, P. O. Awoyera, and K. R. Kumar, “Green concrete: A review of recent developments,” in *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2020, vol. 27, pp. 54–58. doi: 10.1016/j.matpr.2019.08.202.
- [3] J. Turk, Z. Cotič, A. Mladenovič, and A. Šajna, “Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA,” *Waste Management*, vol. 45, pp. 194–205, Feb. 2015. doi: 10.1016/j.wasman.2015.06.035.
- [4] T. Błaszczyszki and M. Król, “Usage of Green Concrete Technology in Civil Engineering,” in *Procedia Engineering*, 2015, vol. 122, pp. 296–301. doi: 10.1016/j.proeng.2015.10.039.
- [5] M. Karimaei, F. Dabbaghi, A. Sadeghi-Nik, and M. Dehestani, “Mechanical performance of green concrete produced with untreated coal waste aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 233, Feb. 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117264.
- [6] V. Vishwakarma and D. Ramachandran, “Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives – A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 162. Elsevier Ltd, pp. 96–103, Feb. 20, 2018. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.174.
- [7] S. Zhang, Z. Ghoulah, and Y. Shao, “Green concrete made from MSWI residues derived eco-cement and bottom ash aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 297, Aug. 2021. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123818.
- [8] H. Alabduljabbar, H. Mohammadhosseini, M. M. Tahir, and R. Alyousef, “Green and sustainable concrete production using carpet fibers waste and palm oil fuel ash,” in *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 39, pp. 929–934. doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.047.

Reduce energy consumption in the building by storing energy in phase change materials

Mehrdad Shishegaran ¹

¹ Group the Road, Bridges and Canals,
Student of master degree in University of castella La Mancha
Ciudad Real center, Ciudad Real -España

* Persona de contacto: Mehrdad.Shishegaran@alu.uclm.es

ABSTRACT

The use of new energy sources has always been of interest to researchers. One of the solutions that is not more important than finding new energy sources is the expansion of energy storage equipment and materials. In addition to energy storage, some of these materials also have the role of thermal insulation. One of the problems facing technology in this field is energy storage in a suitable form so that it can be converted into the required form when necessary. The use of energy storage system not only increases the performance and reliability of the system but also reduces energy consumption. One of the new and efficient methods in the field of thermal energy storage is the use of phase change materials(PCM). In this paper, the thermal efficiency of bricks equipped with phase change materials is investigated. The results show that the use of phase change materials reduces the amount of heat flux entering the building by 38%. Also, increasing the number of pores of the phase change material in the brick reduces the heat flux and cooling load by 11%.

KEYWORDS: Energy storage, phase change materials, numerical simulation.

1.INTRODUCTION

Thermal energy can be stored in materials in the form of sensible and latent heat storage. In sensible energy storage, thermal energy is stored by increasing the temperature in a solid or liquid body. The amount of sensible energy stored in the body is a function of temperature, specific heat capacity and the amount of the body. Water is one of the best materials for sensible energy storage due to its high specific heat capacity and cheapness. But at temperatures above 1000 degrees Celsius, oils, metals and molten salts replace water. Thermal energy storage by the body is hidden when the phase of the body changes from solid to liquid or liquid to gas. In designing any energy storage system based on phase change materials, at least three of the following should be considered:

- 1- Suitable PCM material with desired melting temperatura.
- 2- Heat exchanger with suitable heat exchange level
- 3- PCM storage chamber that is capable of absorbing and compatible with PCM volume changes during phase change.

Phase change materials store energy in the form of latent heat of fusion.

These materials release energy at about the same temperature as they absorb. The amount of energy stored in these materials is 5 to 14 times bigger than the energy that materials such as water or rock can store . In selecting PCM, the melting temperature and characteristics must be taken into account. Its thermodynamics, chemicals as well as cost-effectiveness should be considered. The choice of PCM type depends

on the application and design temperature of the system, the operating temperature of the system for heating or cooling must be proportional to the phase change temperature of the PCM. The higher the latent heat of melting of PCM, the smaller the dimensions of the storage system and also the higher the heat transfer coefficient can help to charge and discharge the system. The higher the PCM density, the smaller system can be designed and the use of materials with minimal volume changes when changing phase with low vapor pressure, minimizing concerns about environmental problems.

There are many organic and inorganic phase change materials due to the phase change temperature and latent melting temperature. However, except for the melting point temperature and latent melting point temperature, most of these materials do not have at least one or more of the above specifications for an ideal PCM, so the system should be designed in such a way to compensate these lacks. For example, it is possible to increase the conductive heat transfer coefficient by considering iron blades inside the material holding chamber.

Phase change materials have been used as thermal energy storage in buildings since the 1980s. With the development of PCM, the use of these materials in walls, ceilings, floor shutters as part of the heating-cooling system of buildings have expanded.

The use of PCM in buildings has two purposes:

- Use the natural heat of the sun for heating or the cold of the night for cooling during the day time.
- Use of cold or heat generated by cooling-heating equipment.

There are basically three ways to use PCM to heat or cool buildings[1].

- PCMs on the walls of buildings.
- PCMs In other components of the building except the wall
- PCMs Store in cold or hot tanks.

2. review of previous studies

Various researches have been done on PCMs in terms of their structure in energy storage.

Soda[2] experimentally investigated the effect of using sodium thiosulfate pentahydrate in an inactive open circuit solar water heater system and compared it with without PCM system. The results proved a 2.59-3.45 times increase in energy storage compared to conventional systems without PCM.

The use of PCM in the solar air heating system, similar to solar water heaters, increases the capability and reliability of the system in the absence of solar radiation. In selecting PCMs to be used in these systems, the basis for selection should be the melting temperature, not the latent melting heat.

Anib [2] tested a natural-flow solar air heater equipped with a PCM storage. Changes in ambient air temperature were recorded in the range of 19-41 ° C and the amount of daily radiation was about $4.9-19.9 \frac{MJ}{m^2}$

The maximum increase in air temperature was about 15K and the amount of useful energy stored efficiency was set at about 50%. These systems can be used as dryer herbs or medicines that should not be exposed to direct sun radiation.

The use of PCM in the walls, not only make them lighter, but also brings energy storage. The PCMs used in this field are mainly hydrogen salts or hydrocarbons, which are usually combined with Iron additives materials to increase the thermal conductivity.

Bordo[3] examined two energy storage walls. The results showed that the wall with 8.1 cm thick with phase change material has better thermal performance than the 40 cm wall is made only of building normal materials.

Radiant underfloor heating has many advantages over convection heating. In this method, in addition to creating more favorable heat, no additional space is used to install heating equipment. If electric heating is used in the floor, it is possible to save electricity consumption during the day by using phase change materials in the floor materials. In this method, at night, when electricity consumption is lower, by turning on the electrical system, the phase change material melts and stores heat inside it, and during the day, this heat is returned to the environment by cutting current electricity off. consequently not only the electricity can be save (especially in areas where the price of electricity is higher during the day than at night) but also Power generation by power plants is going to be balanced[4].

By placing PCM in suspended ceilings, they can be used as part of the heating or cooling system. Kodo and Lamato[3] examined the effect of using PCM capsules in the ceiling along with the air conditioning system. The melting of the phase change materials used in this research is about 25 ° C and close to room temperature. KIM and DARKO[5] investigated PCMs thermal in

random mixing mode. The heat flux improved was 20 to 50% for the studied materials.

Scott and colleague[6] Experimentally studied the thermal properties of PCM.

Zhang and his colleagues introduced a type of wall equipped with PCM which helped Thermal improvement and reduction of air conditioning system load achieved.

In this paper, a two-dimensional study of a wall equipped with phase-shifting materials is investigated. The bricks used are equipped with a cubic space to place phase change materials. In order to investigate the thermal performance of bricks, modeling was performed on a hot summer day for Tehran.

3.How it works

Figure 1 shows a section of a wall equipped with phase change materials.

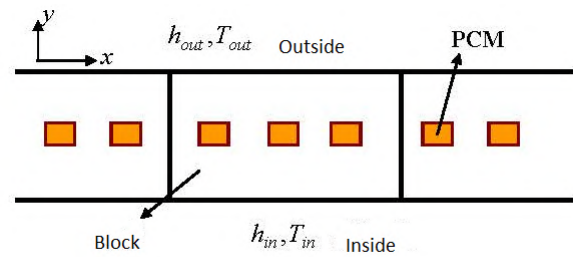


Figure 1: Wall section equipped with PCM

As can be seen in Figure 1, in the interior spaces of the wall which have been shown above, PCM are placed. Two-dimensional analysis can be used because the height of the wall is small compared to the length and width of the brick. The number of cavities of PCM in this study is considered as one.

The dimensions of the examined brick are : $15CM \times 15CM \times 25CM$.

PCM cavities have dimensions of $6CM \times 3CM$.

In this investigation three modes of bricks without PCM and bricks with PCM with one and two holes and two types of PCM are tested. Meteorology at different times is shown in Figure 2.

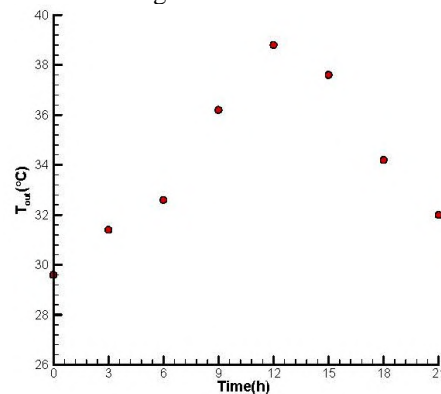


Figure 2: Outdoor conditions at different times for Tehran (July 28)

4. ruling equations

Considering the symmetry and 2D analysis and considering the mentioned dimensions, the solution domain was considered according to Figure 3. Figure 3 illustrate a brick with a cavity of PCM. A similar analysis is performed for a larger number.

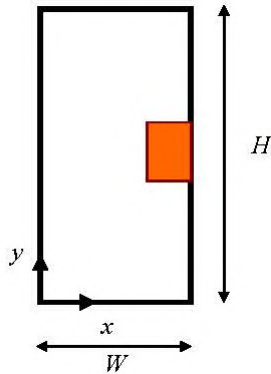


Figure 3: Solution domain diagram according to the hypotheses

According to the solution domain of Figure 3, the governing equations are as follows

For brick :

$$(\rho C)_b \frac{\partial T_b}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_b \frac{\partial T_b}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_b \frac{\partial T_b}{\partial y} \right) \quad (1)$$

For PCM :

$$(\rho C)_{PCM} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{PCM} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{PCM} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

Appropriate values for heat can be used to simulate latent heat Specificity and density used. For this purpose we have:

For:

$$T \leq T_m$$

In the above equation T is the temperature ($^{\circ}\text{C}$), T_m is the melting temperature ($^{\circ}\text{C}$), ρ is the density (KG/m^3)

$$(\rho C)_{pcm} = (\rho C)_{solid} \quad (3)$$

For :

$$T_m \leq T \leq T_m + \Delta T$$

$$(\rho C)_{PCM} = \frac{(\rho C)_{solid} + (\rho C)_{liquid}}{2} + \frac{\rho_{solid} + \rho_{liquid}}{2} \left(\frac{\lambda}{\Delta T} \right) \quad (4)$$

For :

$$T \geq T_m + \Delta T$$

$$(\rho C)_{PCM} = (\rho C)_{liquid} \quad (5)$$

In the above relations, λ is the latent heat of melting, C is the specific heat of melting. ΔT is also the range of phase transition and change, where $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$ is considered here[8].

The design temperature inside is 23.5°C . Simulations are performed until periodic conditions are established.

The thermal properties of bricks and other necessary values are given in Table 1.

material	Bricks	n-Eicosane	P116
$T_m(^{\circ}\text{C})$	-----	29	47
$k \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \right)$	0.7	Solid and liquid 0.15	Solid and liquid 0.27
$C(\text{KJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C})$	0.84	Liquid:2.04 Solid :2.01	Liquid: 1.9 Solid :2.4
$\rho \left(\frac{\text{KG}}{\text{m}^3} \right)$	1600	Liquid:856 Solid:758	Liquid:733 Solid :830
$\lambda \left(\frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \right)$	-----	241	225

Table 1: Thermal and physical properties of bricks and PCM

P116 and n-Eicosane are chemical material that are not exist in the nature .difference between them are about their molecular structure .

5. Boundary conditions

According to Figure 3, the boundary conditions of the solution are as follows:

Internal surface boundary condition at $y=0$

$$-k_b \frac{\partial T_b}{\partial y} = h_{in}(T_{in} - T_{Si}) \quad (6)$$

External surface boundary condition at $y=H$

$$-k_b \frac{\partial T_b}{\partial y} = h_{out}(T_{out} - T_{so}) \quad (7)$$

In the above equations, T_{Si} is Internal surface temperatura k is the Conduction heat transfer coefficient ,h is the displacement heat transfer coefficient and T_{so} is Exterior surface temperature. At the point of contact between the brick and the PCM, it can be written

$$k_{PCM} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial n} = -k_b \frac{\partial T_b}{\partial n} \quad (8)$$

Along the line of symmetry ($x=0, x=w$):

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=w} = 0 \quad (9)$$

6. Numerical solution method

In the previous section, the governing equations and the numerical solution method were presented. The finite volume method is used to solve the above equations. Details of the solution method are given in the reference[9].

Solving the system of equations obtained by line-by-line method is performed by TDMA algorithm.

7. Results

Effect of PCM type

To investigate the effect of PCM type, the internal heat flux can be compared. The melting temperature of all PCMs was investigated in two ways. For P116, the melting temperature is higher than the operating temperature on the day under study. Therefore, this material only has an insulating role in this case.

Of course, due to the specific heat coefficient and higher density, it plays the role of energy storage better than n-Eicosane.

Figure 4 shows a comparison of the internal surface heat flux for the three modes studied with a PCM cavity. As shown in the figure, n-Eicosane transmits less flux with the inside compared to other modes. This is due to its function as both an insulator and energy storage in phase change mode. It is observed that the brick alone is not suitable to prevent the transfer of external heat flux into the interior. In the summer, when high costs are used to generate cooling, the optimal use of energy-saving materials can reduce energy consumption, especially electricity. These materials can also delay the peak consumption time for different cooling systems.

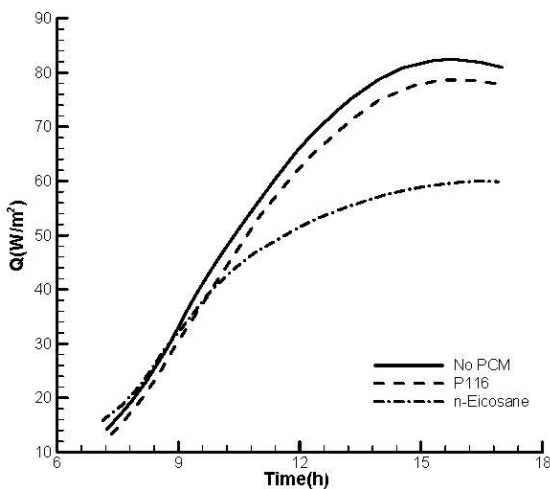


Figure 4: Comparison of internal flux in three modes[10]

Figure 5 shows the effect of the number of PCM cavities in reducing the heat flux entering the building for P116. It is observed that increasing the number of cavities reduces the heat flux entering the building. In fact, with increasing the number of holes, the amount of available PCM has increased. This increase in PCM makes the brick a better insulator.

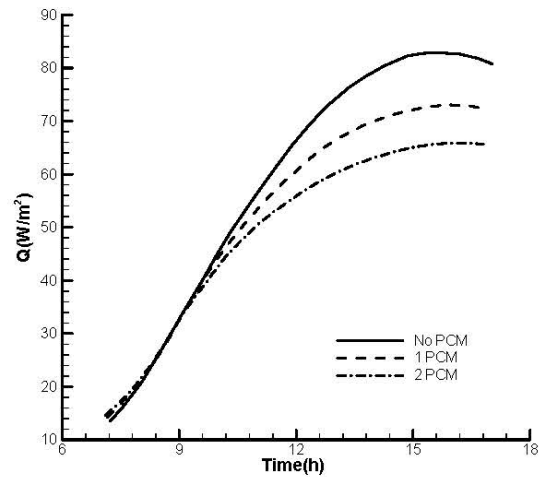


Figure 5: Comparison of the number of PCM holes for P116[10]

8. conclusion

In this paper, heat transfer in bricks with and without energy storage material was investigated. Research shows that the use of energy-saving materials and phase change in bricks reduces energy consumption. It is necessary to note that in order to achieve better performance, the melting temperature of the materials should be in the working temperature range, so that in addition to their insulating properties, the phase change properties can also be used. The use of phase change materials reduces the amount of heat flux entering the building by 38%. Also, increasing the number of pores of phase change materials in the brick reduces the heat flux and cooling load by 11%.

References

- [1]- Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and application", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 318–345, 2009.
- [2]- Canbazoglu S, Sahinaslan A, Ekmekyapar A, Gokhan Aksoy Y, Akarsu F., "Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar waterheating system". *Energy and Buildings*, Vol.37, pp.235– 42, 2005.
- [3]- Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D., "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.13, pp. 318–345, 2009.
- [4]- Lin K.P., Zhang Y.P., Xu X., Di H.F., Yang R., Qin P.H., "Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape stabilized PCM plates". *Building and Environment*, Vol.39 (12), pp.1427–34, 2004.
- [5]- J. Kim, K. Darkwa, "Simulation of an integrated PCM wallboard system", *International Journal of Energy Research*, Vol. 27, pp. 213–223, 2003.

[6]- S. Scalat, D. Bann, D. Hawes, J. Paris, F. Haghghata, D. Feldman, "Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard", *Solar Energy Materials and Solar*, Vol.44, pp. 49–61, 1996.

[7]- M. Zhang, M. Medina, J. King, "Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change material for on-peak air conditioning demand reduction and energy saving in residential building", *International Journal of Energy Research*, Vol.29, pp. 795–809, 2005.

[8]- Esam M. Alawadhi, "Thermal analysis of a building brick containing phase change material", *Energy and Buildings*, Vol. 40, pp. 351–357, 2008.

[9]- Patankar SV. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation; 1980.

[10]- hagh shenas kashani samira ,the effect of phase change material to reduce the electricity consumption in air conditioning duct International Conference on Heating, Ventilating and Air Conditioning·Tehran·<https://civilica.com/doc/66725>.

LA EVOLUCIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y SU CONSUMO ENERGÉTICO

P. I. Bohorquez Aliaga¹

¹ Innovación e Investigación en Ingeniería Civil
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Castilla-La Mancha
Edificio Politécnico. Av. Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real-España

*Persona de contacto: pedroivar.bohorquez@alu.uclm.es

RESUMEN

El presente trabajo de investigación es un análisis de los diferentes tipos de tratamiento, su evolución (de convencional a avanzado) y su correspondiente consumo energético en los últimos años, tomando como modelo una estación de tratamiento de agua potable (ETAP), gracias a un estudio basado en herramientas fiables tales como monitoreos, control de los parámetros del proceso y pruebas experimentales. Las fuentes objetivo fueron las de agua cruda, que se refieren a las aguas subterráneas y superficiales, que a su vez se subdividen en aguas superficiales con recarga artificial y filtración en las riberas de los ríos. Se resalta la importancia de tratamientos innovadores y avanzados, como tratamientos biológicos, con lodos metálicos, además de los tratamientos convencionales. Dichos procesos son evaluados para implementarse con un bajo consumo de energía y especialmente para los países en desarrollo.

PALABRAS CLAVE: agua potable, tratamiento de agua, estaciones de tratamiento de agua, tratamiento avanzado, tratamiento convencional.

ABSTRACT

This paper is an analysis of the different types of treatment, their evolution (from conventional to advanced), and their corresponding energy consumption in recent years, taking a drinking water treatment plant (DWTP) as a model, thanks to a study based on reliable tools such as monitoring, control of process parameters and experimental tests. The target sources were raw water, which refers to groundwater and surface water, which in turn is subdivided into surface water with artificial recharge and filtration on riverbanks. The importance of innovative and advanced treatments, such as biological treatments, with metal sludge, in addition to conventional treatments, is highlighted. Such processes are evaluated to be implemented with low energy consumption and especially for developing countries.

KEYWORDS: Drinking water, water treatment, water treatment plant, advanced treatment, conventional treatment.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los tratamientos de agua potable se han vuelto cada vez más complejos ya sea por el deterioro de la oferta, es decir las fuentes de agua, y la implementación de unos límites legislativos más restrictivos. Esto porque los límites máximos permisibles de la mayoría de países se basaron en los valores dados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Dichas directrices para la calidad del agua potable redujeron por ejemplo el límite del arsénico total (As) de 50 a 10 $\mu\text{g/L}$. Así mismo, muchas estaciones de tratamiento de agua potable (ETAPs) han presentado problemas relacionados con aspectos técnicos y de funcionamiento, especialmente para estaciones pequeñas y medianas [1].

Para garantizar la calidad del agua alta y segura y mejorar el funcionamiento de las ETAPs, es necesario un enfoque metodológico que incluye la evaluación del desempeño del sistema de tratamiento y de los contaminantes presentes en la fuente, para la implementación de un protocolo viable con el menor consumo de energía

posible. En la bibliografía revisada, algunos autores desarrollaron diferentes métodos para evaluar el funcionamiento de las ETAPs, la caracterización de los diversos contaminantes en función de la fuente y de la comparación de nuevos métodos avanzados frente a los convencionales.

En este contexto, el objetivo de esta investigación es revisar, identificar y describir los resultados de los desafíos y necesidades que involucran un tratamiento de agua potable seguro.

CONTAMINANTES MÁS COMUNES EN EL AGUA SEGÚN SU FUENTE

Uno de los contaminantes más comunes en la mayoría de las fuentes subterráneas y superficiales de agua son los metales pesados. Un metal pesado es un material en forma de elemento, compuesto o aleación, que es típicamente duro, opaco, brillante y tiene buenas propiedades térmicas y conductividad eléctrica. Poseen una gravedad superior a 4 o 5 y se han asociado con la contaminación y toxicidad potencial. Los metales

pesados que son tóxicos son el arsénico (As), cobre (Cu), zinc (Zn), níquel (Ni), cromo (Cr) y plomo (Pb). La exposición prolongada a metales pesados por ingesta o inhalación es peligrosa porque tienden a acumularse y se retienen por el cuerpo humano ocasionando daños potenciales en los riñones, cánceres de piel y pulmón y problemas neurológicos [2].

De los metales pesados antes mencionados, se resalta la presencia del arsénico (As), un elemento natural en la corteza terrestre, especialmente en lugares cercanos a volcanes y/o mantos ígneos. La EPA ha identificado al arsénico como un carcinógeno "conocido" del grupo A. Beber agua rica en arsénico durante un período prolongado conduce a una intoxicación por arsénico conocida como arsenicosis, la cual se manifiesta con el desarrollo de síntomas de hiperpigmentación, cáncer de piel, daño renal, cáncer de hígado, trastornos circulatorios y otras dolencias.

En el ambiente, el arsénico ingresa al suelo y contamina el agua subterránea por medio de reacciones/procesos geotécnicos y efectos antropogénicos, como la descarga de desechos industriales y agrícolas con contenido elevado de arsénico, seguidos por efectos de lixiviación y escorrentía posteriores. En consecuencia, diversas zonas en el planeta se han infestado por la contaminación por arsénico en las aguas subterráneas, lo que se ha considerado como un problema ambiental global.

Por lo tanto, es de suma importancia determinar valores por debajo de los umbrales tolerables establecidos de arsénico en el agua potable [3].

Existe también la presencia de materia orgánica natural (MON), la cual se encuentra en el agua superficial y subterránea. Este contaminante también puede estar presente en las aguas del suelo. Incluye fracciones húmicas (hidrofóbicas) y no húmicas (hidrofilicas). [2].

Por otra parte, tenemos a los contaminantes inorgánicos y los organismos microbiológicos. Los contaminantes inorgánicos son compuestos que no contienen carbono o solo contienen carbono unido a elementos distintos del hidrógeno. Consisten en nitrógeno, sulfato, fosfato y cloruros. Los compuestos de nitrógeno se han clasificado como amoníaco-nitrógeno (NH₃-N), nitrito-nitrógeno (NO₂-N) y nitrato-nitrógeno (NO₃-N). No hay límite para el nivel de amoníaco en el agua potable regulada por el EPA. La contaminación de patógenos microbianos en el agua potable provoca enfermedades diarreicas. La contaminación microbiana incluye coliformes totales (coliformes fecales y *Escherichia Coli*), *Legionella*, *Giardia lamblia*, *Cryptosporidium* y virus. La contaminación por estos microorganismos por lo general proviene de desechos fecales humanos y animales que contienen microorganismos patógenos.

Dichos microorganismos patógenos deben ser eliminados del agua potable antes de que sea segura para beber. La EPA ha reglamentado que el total de coliformes en el agua potable debe ser inferior al 5% de las muestras al mes. [2].

Se revisó también las características de las sustancias perfluoroalquilo y polifluoroalquilo (PFAs), su presencia en aguas superficiales y su destino en los procesos de

tratamiento de agua potable. Las PFAs se han detectado en todo el mundo en el ambiente acuático, incluida el agua potable, en concentraciones mínimas y, en parte, debido a su persistencia en el tejido humano, algunas se están investigando para su regulación. Son compuestos alifáticos que contienen enlaces de carbono-fluoruro saturados y son resistentes a la degradación biológica. Los datos de presencia de estaciones de tratamiento de agua potable a gran escala indican que los PFAS, si están presentes en el agua sin tratar, no se eliminan sustancialmente mediante la mayoría de los procesos convencionales de tratamiento de agua potable [4].

Por último, a raíz del crecimiento poblacional y la industrialización, tenemos a los contaminantes de preocupación emergente (CPEs). Los CPEs son productos químicos orgánicos sintéticos que se utilizan en todo el mundo, en productos, bienes y la vida diaria. Las principales fuentes puntuales de estos productos químicos incluyen estaciones de tratamiento de aguas residuales, industrias y hospitales. [5].

TIPOS DE TRATAMIENTO

Los procesos convencionales de tratamiento de agua potable (por ejemplo, filtración de arena y floculación) suelen ser eficientes para eliminar patógenos independientemente de su tipo de fuente.

La coagulación-floculación es una técnica química de tratamiento del agua que se aplica, típicamente, antes de un proceso físico de separación que suele hacerse por sedimentación o filtración, con el fin de mejorar su capacidad de eliminación de partículas. La coagulación (C) neutraliza cargas y forma una masa gelatinosa que atrapa (o une) partículas, aumentando su tamaño de modo que puede quedar atrapada en el filtro o sedimentar. La floculación (F) mueve suavemente o agita tales partículas, haciendo que se unan formando masas mayores que sedimentan con más facilidad o pueden ser filtradas. La filtración rápida de arena (FR) es un método completamente físico de tratamiento de agua potable en el que se consigue una eliminación rápida y eficiente de partículas suspendidas relativamente grandes. La principal ventaja de un filtro de arena es que no solo separa las partículas y los sólidos en suspensión del agua, sino también otros componentes químicos, como micro contaminantes, compuestos de nitrógeno, metales pesados, pesticidas, y contaminantes biológicos (microorganismos patógenos, tales como patógenos humanos, virus y bacterias) [2].

La aireación (A) del agua es un proceso que consiste en agregar aire para permitir la biodegradación aeróbica de los componentes contaminantes, así como la eliminación de olores y sabores producidos por gases disueltos en el agua.

Entre también varios métodos mejorados e innovadores, como la ósmosis inversa, la precipitación, la coagulación, el intercambio iónico, la extracción con solventes, la adsorción, la filtración por membrana y la ultrafiltración empleada [3].

Se ha demostrado que el tratamiento a través de materiales de sorción, como el carbón activado granular (CA) elimina los CPEs y las PFAs, pero comúnmente no se logra la eliminación completa debido a la unión débil de algunos CPEs, lo que reduce la eficiencia de eliminación de los CPEs con aumento del tiempo de operación del material y coabsorción de materia orgánica disuelta. [5].

Muchos estudios han indicado que los lodos de hierro y aluminio (LHA) sí se pueden utilizar en procesos de tratamiento de remoción de CPEs. Se pueden utilizar para eliminar el fósforo de las aguas residuales en el proceso de adsorción o precipitación química, para eliminar sustancias orgánicas y suspensiones de aguas residuales, para controlar el aumento de volumen de lodos activados, así como la digestión en el lodo y mejorar sus propiedades de drenaje.

Dichos estudios han determinado la eficacia del proceso del lodo utilizado como suspensión hidratada, originalmente en una estación de tratamiento de agua, y en forma suelta, es decir, después de haber sido secado. [6].

Las PFAs también puede ser removidas por ósmosis inversa (OI), que es un proceso físico químico mediante el cual se purifica una muestra de agua eliminando las partículas en suspensión utilizando presión osmótica haciéndola pasar a través de unas membranas semipermeables.

Y finalmente tenemos el tratamiento biológico. El proceso biológico comenzó a hacerse popular para el tratamiento de las aguas residuales a principios del siglo XX, pero no para el tratamiento de agua potable. Aunque se ha utilizado el tratamiento biológico de agua potable (BioDWT) desde la década de 1800, su aplicación a nivel mundial aún es limitada. El BioDWT es totalmente dependiente de las bacterias no patógenas que actúan como biocatalizadores para la oxidación bioquímica (OB), degradando los contaminantes en el agua potable contaminada y producir agua biológicamente estable para prevenir el crecimiento de microorganismos en el sistema de distribución de agua. [2].

MÉTODOS

El análisis llevado a cabo en esta sección se refiere a la identificación de 12 sistemas típicos, en función de la fuente y tipo de tratamiento.

El procedimiento de evaluación está compuesto de tres fases: La fase 1 consistió en la recopilación de los principales contaminantes en el agua en las dos últimas décadas, sus componentes y los efectos nocivos que causa en la salud humana. La fase 2 se trató sobre los diferentes tipos de tratamiento, desde los convencionales hasta los avanzados. Y, por último, la fase 3 consistió en elaborar una tabla considerando el tipo de fuente donde se encuentra los contaminantes de la fase 1 con un correspondiente sistema de tratamiento propuesto en la fase 2, de manera que se pueda identificar rápidamente que tipo de tratamiento es recomendable. [7].

Tabla 1. Fuentes de agua cruda y esquemas de tratamiento (Elaboración propia)

		Tipo de tratamiento		
		Tratamiento convencional	Tratamiento avanzado (TA)	Tratamiento convencional y avanzado
Tipo de fuente	Agua subterránea cruda	A, FR	CA, LHA, A, FR, OI, OB	A, FR y TA
	Agua superficial	C, F, S	CA, LHA, A, FR, OI, OB	C, F, S y TA
	Agua superficial + Recarga Artificial (RA)	A, C, S, FR, RA	CA, LHA, A, FR, OI, RA, OB	A, C, S, FR, RA y TA
	Filtración de la ribera de río	Post tratamiento: A y/o FR	Post tratamiento: CA, LHA, A, FR, OI, RA, OB	Post tratamiento: A y/o FR y TA

A: Aireación
 FR: Filtración rápida de arena
 C: Coagulación
 F: Floculación
 S: Sedimentación
 CA: Carbón activado granular
 LHA: Lodos de hierro y aluminio
 OI: Ósmosis inversa
 OB: Oxidación bioquímica

En la Tabla 1, se muestra un cuadro de doble entrada donde se indican los esquemas de tratamiento para cada fuente de agua cruda, con su correspondiente leyenda en la parte inferior. Como se pudo apreciar, cada sistema propuesto fue descrito anteriormente en el acápite de Tipos de Tratamiento.

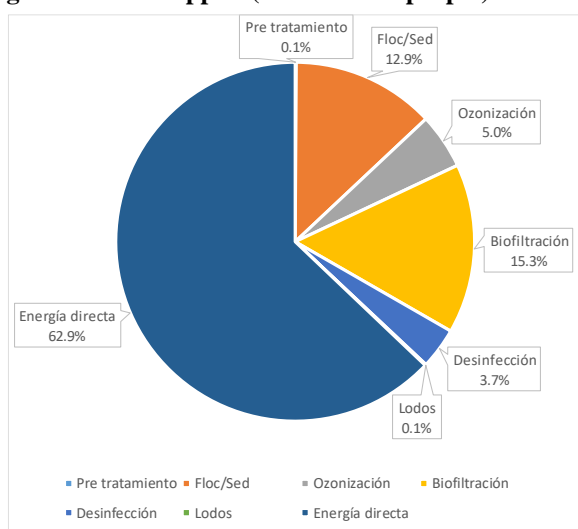
CONSUMO DE ENERGÍA EN FUNCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Este acápite consistió en la revisión del consumo de energía de una estación de tratamiento de referencia, donde algunos de los diferentes sistemas mencionados en el acápite de Tipos de Tratamiento presentan un consumo diferente, de manera que podemos identificar cual representa un valor mínimo y de esa forma ser económicamente sustentable.

Se tomó como ejemplo el caso de la estación de tratamiento David L. Tippin (Tippin WTF), ubicada en Tampa, Estados Unidos. La energía incorporada operativa promedio de 2002-2010 de Tippin WTF se estimó en 7,17 MJ/m3 de agua tratada. La figura 1 muestra que el 62,9% se debió a la energía directa. Esta contribución proviene principalmente del uso de la bomba de alto servicio para transporte de aguas tratadas a través del sistema de distribución. El 37,1% restante se debe a la energía indirecta asociada con los químicos de tratamiento. Los productos químicos utilizados en los procesos unitarios de floculación/sedimentación y biofiltración combinados son responsables del 76% del total de energía indirecta incorporada. El sulfato férrico, utilizado en el paso de floculación/sedimentación, requiere 4,86 MJ/kg de sulfato férrico producido y transportado a Tippin WTF, y se agrega a una dosis promedio relativamente alta de aproximadamente 156 mg/L. Este valor de factor de energía (ε) es bajo en comparación con los coagulantes alternativos, como el

sulfato de aluminio (alumbre, 10,8 MJ/kg) y el cloruro férrico (17,7 MJ/kg). La sosa cáustica es la razón principal del alto consumo indirecto de energía asociado con la biofiltración. Sin embargo, la dosis promedio es de aproximadamente 41 mg/L, que es menor que la del sulfato férrico. A pesar del alto valor ϵ de la biofiltración (67,1 MJ/kg), solo es responsable del 0,4% de la energía incorporada operativa indirecta, ya que solo hubo cuatro meses entre 2002 y 2010 cuando se repuso. La variación en las energías incorporadas de producción y transporte se debe a los diferentes procesos de fabricación y distancias de transporte de los productos químicos y materiales mencionados. [8].

Figura 1. Desglose de la energía incorporada operativa total para la estación de tratamiento de agua David L. Tippin. (Elaboración propia)



CONCLUSIONES

Hoy en día, se está descubriendo un número creciente de contaminantes emergentes en las fuentes de agua cruda, especialmente en aguas superficiales. La investigación de este paper brinda una descripción general de las clases de contaminantes emergentes que son relevantes para la producción de agua potable.

En este paper se han discutido algunas tecnologías para la eliminación de contaminantes a diferentes niveles de tratamiento. El proceso biológico a través de biopelículas es un concepto relativamente nuevo y se considera una "tecnología futura" para la producción de agua potable segura y de alta calidad, a la vez que según el análisis de la estación de tratamiento Tippin, es uno de los tratamientos con más consumo de energía (15.3%).

Debido a que existen muchas configuraciones diferentes para el tratamiento del agua potable, el presente paper dio una estimación del consumo de energía en función del tipo de tratamiento para una planta modelo, un procedimiento que podrá ayudar a estimar el costo de la calidad del agua tratada.

REFERENCIAS

- [1] S. Sorlini, M. C. Collivignarelli, F. Castagnola, B. M. Crotti, and M. Raboni, "Methodological approach for the optimization of drinking water treatment plants' operation: a case study," *Water Science and Technology*, vol. 71, no. 4, pp. 597-604, 2015, doi: 10.2166/wst.2014.503.
- [2] H. Abu Hasan, M. H. Muhammad, and N. I. Ismail, "A review of biological drinking water treatment technologies for contaminants removal from polluted water resources," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 33, Feb 2020, Art no. 101035, doi: 10.1016/j.jwpe.2019.101035.
- [3] J. N. Bhakta et al., "Current status of arsenic contamination in drinking water and treatment practice in some rural areas of West Bengal, India," *Journal of Water Chemistry and Technology*, vol. 38, no. 6, pp. 366-373, Nov 2016, doi: 10.3103/s1063455x16060114.
- [4] M. F. Rahman, S. Peldszus, and W. B. Anderson, "Behaviour and fate of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water treatment: A review," *Water Research*, vol. 50, pp. 318-340, Mar 1 2014, doi: 10.1016/j.watres.2013.10.045.
- [5] R. Troger et al., "What's in the water? - Target and suspect screening of contaminants of emerging concern in raw water and drinking water from Europe and Asia," *Water Research*, vol. 198, Jun 15 2021, Art no. 117099, doi: 10.1016/j.watres.2021.117099.
- [6] K. Piaskowski, "Orthophosphate removal from aqueous solutions using drinking-water treatment sludge," *Water Science and Technology*, vol. 68, no. 8, pp. 1757-1762, 2013, doi: 10.2166/wst.2013.344.
- [7] J. P. van der Hoek, C. Bertelkamp, A. R. D. Verliefe, and N. Singhal, "Drinking water treatment technologies in Europe: state of the art - challenges - research needs," *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, vol. 63, no. 2, pp. 124-130, 2014, doi: 10.2166/aqua.2013.007.
- [8] M. V. E. Santana, Q. Zhang, and J. R. Mihelcic, "Influence of Water Quality on the Embodied Energy of Drinking Water Treatment," *Environmental Science & Technology*, vol. 48, no. 5, pp. 3084-3091, Mar 4 2014, doi: 10.1021/es404300y.

Environmental Impact Assessment of Haraz’s dam Construction

Mohammad Asgari¹

¹ Group the Road, Bridges and Canals,
Student of master degree in University of castella La Mancha
Ciudad Real center, Ciudad Real -España

* Persona de contacto: Mohammad.asgari@alu.uclm.es

RESUMEN

Con respecto al crecimiento y desarrollo de la construcción de presas en el mundo. La interacción entre la construcción de presas y el medio ambiente se puede estudiar en forma de impactos ambientales de las presas. Debido a la ubicación de la represa HARAZ en el valle de Mangol, que se encuentra en el hábitat principal de los bosques de Hirkani, animales acuáticos y especies animales únicas en esta región. El siguiente punto sobre la represa se ubica en el vertedero de residuos de la ciudad de Amol -EMARAT-, 5 km por debajo de la represa, el cual se espera penetre en la laguna con un desnivel del área vertida al agua desde la represa y llegue a los embalses de agua potable agua, la calidad del agua potable en el área también ha disminuido drásticamente y ha creado la causa de la aparición de enfermedades graves en la comunidad humana. Este estudio trató de evaluar y calcular los riesgos de esta represa por los métodos AHP y TOPSIS para determinar los riesgos reales y finalmente por el método RAM-D se cuantificaron todos los riesgos. Los resultados del estudio muestran que la penetración del látex, los deslizamientos de tierra y los malos efectos sobre la biodiversidad regional son, respectivamente, los riesgos más peligrosos debido a la operación de la represa HARAZ.

ABSTRACT

With regard to the growth and development of dam construction in the world. The interaction between dam’s construction and the environment can be studied in the form of environmental impacts of dams. Due to the location of the HARAZ dam in the Mangol valley, which is located in the main habitat of Hirkani’s forests, aquatic animals and unique animal species in this region. The next point about the dam is located on the Amol city waste disposal site-EMARAT-, 5 km below the dam, which is expected to penetrate the lagoon with a slope of the area released into the water from the dam and reach the reservoirs Drinking water, the quality of drinking water in the area has also declined sharply and created the cause of the emergence of severe diseases in the human community. In this study tried to evaluate and calculate the risks of this dam by AHP and TOPSIS methods because of determination the real risks, and at the end of RAM-D method all risks quantitated. The results of the study shown the latex penetration, landslide and bad effect on regional biodiversity are respectively most dangerous risk because of HARAZ dam operation.

Keywords: Environmental impact Assessment, Haraz dam, Drinking water, Risk evaluation, Risk method

INTRODUCTION

Investigation of the risk caused by the construction of the dam is done by various methods of calculating the risk, taking into account all the parameters in the HARAZ soil’s dam; including placement, the existence of unique herbal and animal species, the threat of water resources, the upper weakness layer, etc. Attempted to identify the risks associated with the AHP risk analysis method. At first this method classified the risk to five categories of physical, chemical, biological, socio-economic, social and cultural risks, health and safety risks shown in Fig 1. Considering that AHP is a semi-quantitative method, therefore, the prioritization of risks in this methodology is also qualitative. According to the circumstances, prioritizes the risks of waste disposal, and wastewater due to the extent of the effective location.

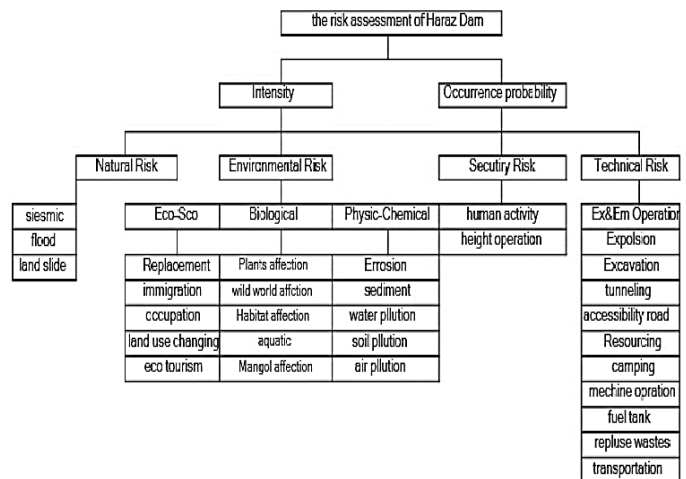


Fig.1. the risk assessment of Haraz dam

Nowadays, human being tries to identify, classify, evaluate, and control the hazards around himself and also the environment, for reach to this purpose specific methods and tools are designed.

Big projects like a dam have potential risks through the time of Construction and also in operation section.

So it is necessary that considered measures to be prepared for these Risks.

Before facing the Risks of these projects, environmental risk assessment of dams would be as a tool for this task. Large dam's construction due to social benefits and their high cost are challenging issue. Some positive point such as flood control, water supply, generation of electricity, tourism attraction and other usage versus changing ecosystems, Drainage of agricultural lands, raising groundwater levels, change the quality of the outlet water and other negative environmental points should have a balance. In recent years, environmental impacts have, along with other issues, interfered with project justification and made project implementation possible or impossible.

Unfortunately, in most of the dams built in Iran, environmental impacts have not been fully addressed. If environmental impact studies were carried out correctly, at the moment it was used in resolving problems in some dams, they could provide useful information to local specialists to use in other dam's construction projects.

In fact Environmental impact assessment is the best tool for achieving the strategic goals of sustainable development.

This information, due to planning acceleration, helps to protect resources well and also prevent as much irreversible effect as possible on the environment and natural resources.

But against the common view of environmental monitoring for dams in studying process, construction and operational AHPses, the scientific society has always had very exact and updated idea in this area.

An article titled Monitoring and Environmental Impact assessment on "Lake Baikal" in which the study of Baikal watershed activity would be a potential threat to the region's environment has shown that. The Irkutsk Dam on the Angara River has significant impacts on global climate change as well as environmental pollution.

Saroval sardar Dam and its impact on public health have been assessed by Singh, Bavisikar, this study has investigated the impacts of the dam on public health and shows that in underdeveloped or developing countries, large project growth is dependent on industry and economics has had direct and indirect outcomes on local societies. In this study, the impact of regulatory dams on vegetation in the Mediterranean region, is evaluated.

Elsewhere, Environmental impact assessment project of Suleiman Tange Dam in "Sari" north of Iran and related installation is done by Ghodrati Ayaz and his team in E-cold matrix [1].

STUDIED AREA

"Haraz Amol storage Dam" (Table 1) is located in north of Iran, 25 km south of Amol city and in Mangol canyon.

This dam on the "Haraz River", is projected to be the second dam after the Lar Dam on the Haraz River, going through a distance of 160 kilometers to the Haraz Dam. The Haraz River originates from the northern part of the Alborz Mountains and Damavand summit in the southern part of the Caspian Sea basin. Its main branch is the River Lar, which crosses "Poloor" by joining the embranchment of the "Chehele Pare", the "Siah Plas", the Alarm and the Valichai.

Haraz Dam has been studied and implemented in order to compensate removed water ascription of Haraz plain from Lar Dam [2].

Type of dam	Earthfill
Length of crown	377 Meters
Height to foundation	150 Meters
Height to base	120 Meters
Volume of dam body	6.10 M cube meter
Normal source volume	240 M cube meter
Efficient volume	151 M cube meter

Table.1. Haraz's dam technical features

METHODOLOGY

This study's objective is to assess the environmental risk of Haraz Dam in the operation AHPse. That's way, AHP method was used to identify, classify and rate the risk options and then, risk analysis was performed using TOPSIS method, risk values were obtained for all 5 envisaged categories.

Environmental Assessment:

Environmental Impact Assessment is the formal process for predicting the impact of a project's activities and performance on the environment, human health, and social welfare and also, that's mean

Systematic identification and assessment impact of projects outcome, programs and plans on physical, chemical, biological, cultural and economic parts of environment. Therefore, Environmental Impact Assessment would be as a programing tool to determine the positive and negative project impact on the environment.

ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP)

It is one of the methods to decide. The word AHP means Analytical Hierarchy process. Selection of criteria or criterion is the first step of AHP analysis, then candidates are evaluated based on identified criteria. The word options or candidates also means the alternative or candidates and is used in a same position a reason for hierarchical call for this method is that we must first start with the goals and strategies of the organization at the top of the pyramid, and by developing them, we can identify the criteria to get to the bottom of the pyramid.

This method is one of the most useful methods for ranking and determining the importance of factors, which is used to prioritize each of the criteria using pair comparisons. If there are many options, it is difficult to form a pairwise comparison matrix. The goal of the hierarchical analysis process technique is to select the best option based on different criteria through pairwise comparison.

This technique is also used to evaluate criteria. Because elements increasing in each cluster makes it difficult to compare pairs, they usually divide "decision criteria" into "sub-criteria". The sub-criteria's determine how to operate a problem and implement the solution.

Criterion: What you select base on it.

Option: What you choose from. The following models are used as popular models in the AHP model.

- Target-criterion
- Target-criterion-sub criteria
- Target-criterion-option
- Target-criterion-sub criteria-option

The first step in the hierarchical process is to determine the effectiveness of each criterion based on the Likert scoring range Table 2. Then, it's graphic scheme formation from case that is shown presented hypothesis base (Target-criterion-option). Chart1 shows the hierarchical structure in this research. In the process of hierarchical analysis, the elements of each level are compared in pairs (two by two) than related element at a higher level and also will be calculated the their weight, then, by combining the comparative weights, the final weight of each option is determined, which is called the total weight.

Effect	Point
Very Important	9
Important	7
Moderate	5
low	3
Very low	1

Table 2: likert scoring range table to criterion

In this research, to compare the options, have been used the minimum of squares ones method and Expert Choice software and the volume of this study was determined using Cochran's relation number 28(1).

$$n = \frac{z^2 pq}{d^2 \left(1 + \frac{1}{N} \left(\frac{z^2 pq}{d^2} - 1\right)\right)} \quad (1)$$

Where:

n: sample size, p: estimated proportion of the population, q: 1-p, z: abscissa of the normal curve, N: population size, d: acceptable sample error.

TOPSIS METHOD

In this method, M option is evaluated by N index. The technique is based on the concept that the selected option should have the lowest distance from the ideal positive solution (best situation) and the also the longest distance from the negative ideal solution (worst case scenario).

This method requires six steps:

First step: make a decision table

Second step: Normalize the decision matrix (2).

$$n_{ij} = a_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2} \quad (2)$$

Where a_{ij} the value j criterion in alternative i

RESULTS

Embankment and excavation have a negative effect on soil erosion and construction, and also making surface water pollution, which can be seen ordinary in the lower level of the Haraz Dam. Tunnel construction is another case in which the soil is attacked, by deforming the ground, it can sometimes contaminate groundwater and has impact on habitats.

One points that many environmental activists notice in building dams is to disrupt the topography of the area and build permanent roads by flooding the dam and flooding the upper part of the dam, and also due to a main overcrowded road next to Haraz Dam, the authorities should decide to build a road for this very large traffic route next to this dam, because of this traffic jam, the road must be wide according to traffic population, so that in the start of road construction process, destruction of native animals habitat, dust distribution, noise pollution in an area that was silent before.

Also, cutting down trees that are several tens of years old and sometimes hundreds of years old is one of the components that increases the risk of building a dam in the area. The rest of the risk is summarized in Table 9.

In attention to the seismic risk zoning of the country, Mazandaran is located in the high earthquake risk zone. Figure 1. Due to the proximity of this dam to the two active faults of Mosha and South Alborz and the intensity of 0.32g waves (g is acceleration of the earth's gravity), this area, despite the lack of an active fault, but the being very loose layer, possible to move largely Due to the activity of these two faults. By applying this point on our result, we can conclude the below pie chart, Fig2.

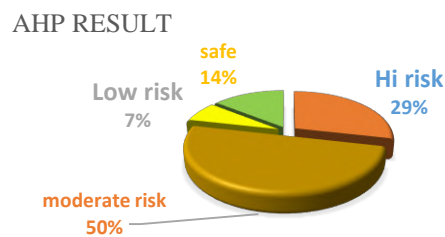


Figure 2: AHP result pie chart

Figure 2, shows the most risks are moderate, but 29% of the risks have a vital role in the dam's stability and the marginal effects on environmental problem that they caused, reveal main problems on the site biodiversity.

The part of safe operation that evaluated, shows that real modeling and classification of risk done.

After analyzing the data by AHP method and scoring them, TOPSIS method was used to prioritize the identified risks of Haraz.

According to the results obtained by TOPSIS, using the TOPSIS method, among the 36 risk factors, erosion, due to the high permeability of the area, it has been studied and with its intensification, while destroying surface soils and damaging vegetation in the first priority, excavation and tillage, following large-scale dam construction project to make a dam reservoir, road construction, tunnels, and camps are the second priority.

Landslides and the possibility of an earthquake are also among the cases that have a medium risk. The total effects of water weight behind dams and sediments have been investigated in three different ways with 9 effective direct components in different water years.

That Minimum in the lowest rainfall of the year and the lowest amount of dam drainage and maximum in the wet year and maximum drainage has been studied. As mentioned above, the presence of a loose layer in the site greatly increases the possibility of landslides; change in microclimate is the last priority due to low impact and effects ignore.

The two methods of AHP and TOPSIS clearly identify the risks and sub-risks arising from the construction of the dam in building AHPse, and clearly show their impact on the ecosystem around the dam, but to analyze the created processes, including the dam's duty, unwanted events that prevent the success of dams.

Conclusion

Dam projects are more risky than other projects because cost of construction and complicated location. So , recognizing the risk sources and uncertainty in the Haraz Dam construction project, it is important to review and evaluate its risk to determine the most important and effective ones in the project.

Before the project operation, Preventive measures and environmental control must be taken.

Undesirable risk factors should also be decrease during the doing project through various measures of education, monitoring and control.

Environmental risk assessment at Haraz dam is critical to address the identified risks and reduce impact. Given that the AHP method is a semi-quantitative method, the prioritization of risks in this method is also qualitative. Prioritizing technical risks in the construction phase of Haraz Dam, excavation and embankment , tunneling , permanent roads building , disposal of waste and and leachate of the landfill site in EMARAT have a great impact due to the size of the site. They have a high level of risk in prioritizing physicochemical risks, erosion, and change in downstream bed. In biological risks, the effects

of aquatic life, the impact on plant species, the impact on wildlife, the impact on the Mangol site, have a large level in the construction phase of Haraz dam.

Earthquakes and earthquakes and landslides, floods are a priority in raging the natural risks of the dam, and risk level is high. At socio-economic risks, land use change, landscape impact, and tourism are moderate. After analyzing the given points to the risk factors and using the AHP method finding to continue evaluating high and medium level risks of all risks, TOPSIS method is used to prioritize the risk identified in the previous step.

The TOPSIS method is one of the most reliable scientific and managerial methods of decision making, and it can be used to make more scientific decisions in the PLACE of logical data and outputs.

REFERENCES

- [1] S.Malmasi, Z.Alahdad, Investigation the risk of Dam's construction with regarding to decision making method: Journal of Dam and Hydroelectric Power Plant 4th Year / No. 14 / December 2017
- [2] H.shahidian, K.Hossieni, M.Afraz, Study of Dam's Environmental Impact Assessment: 16th international conference of Environmental Impact Assessment, Tehran /April 2019/

ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS Y DE LAS VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL USO DEL HORMIGÓN PRETENSADO DE ALTA RESISTENCIA

A. Montalvo¹

¹ Estudiante de Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Castilla-La Mancha.
Avenida Camilo José Cela s/n, 13071, Ciudad Real-España
* Persona de contacto: angelamrosalia.montalvo@alu.uclm.es

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo el estudio de las cualidades del hormigón pretensado de alta resistencia utilizado en la actualidad tanto en edificación como en obra civil, con el objeto de entender las ventajas e inconvenientes del mismo. Se destaca que el hormigón de alta resistencia es aquel que alcanza una resistencia característica de valor mayor a 50 N/mm² en los ensayos realizados a los 28 días, pudiendo llegar a alcanzar valores de 120 N/mm².

Se ha realizado un estudio de las características del hormigón pretensado de alta resistencia, obteniendo una serie de estrategias que permitan obtener el mejor rendimiento. Además, se ha realizado un estudio comparativo del comportamiento del hormigón pretensado de alta resistencia con respecto al hormigón pretensado convencional para la adherencia del hormigón. Por otro lado se ha estudiado el comportamiento a cortante y se ha realizado un análisis comparativo del comportamiento a flexión en hormigones pretensados de altas resistencias y hormigones pretensados de ultra altas prestaciones.

PALABRAS CLAVE: Hormigón de alta resistencia, Pretensado, Hormigón de ultra altas prestaciones

ABSTRACT

The aim of this paper is to study the qualities of high-strength prestressed concrete currently used in both building and civil works, in order to understand its advantages and disadvantages. It is stressed that high-strength concrete is that which achieves a characteristic resistance value greater than 50 N/mm² in tests carried out at 28 days, and can reach values of 120 N/mm².

A study of the characteristics of high-strength prestressed concrete has been carried out, obtaining a series of strategies to obtain the best performance. In addition, a comparative study of the behaviour of high-strength prestressed concrete with respect to conventional prestressed concrete has been carried out for concrete adhesion. On the other hand, the shear behaviour has been studied and a comparative analysis of the bending behaviour of high-strength prestressed concrete and ultra-high strength prestressed concrete has been carried out.

KEYWORDS: High-strength concrete, Prestressed, Ultra-high strength concrete

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, el desarrollo de las sociedades ha estado íntimamente ligado a la capacidad de la población para producir los materiales necesarios que pudiesen satisfacer sus necesidades. Los materiales de construcción han ayudado por lo tanto al hombre a mejorar su calidad de vida. Es por ello que los historiadores definen las diferentes poblaciones según los materiales utilizados en esos tiempos.

Los diferentes materiales de construcción han ido evolucionando hasta el uso actual, desde madera, piedra,

hierro, hormigón, ladrillo y aluminio que son los más frecuentes. Sin embargo, en la actualidad se prueban materiales de cada vez mejores características resistentes como es el caso del hormigón.

En los últimos años, la tecnología del hormigón ha ido experimentando unos avances enormes. Un ejemplo claro es el hormigón de alta resistencia, ya que puede alcanzar valores de hasta dos y tres veces la resistencia de un hormigón convencional. Sus claros beneficios debido a esta gran resistencia, menor deformación y por lo tanto mayor protección, seguridad y durabilidad hacen

del hormigón de alta resistencia un material muy competente.

El tipo de hormigón utilizado para la resistencia a flexión más utilizado es el hormigón pretensado, que junto a un hormigón de alta resistencia tienen importantes cualidades que son objeto de estudio en el presente trabajo. [1]

2. HORMIGÓN PRETENSADO DE ALTA RESISTENCIA

Muchas vigas de hormigón pretensado presentan una resistencia real de hormigón superior a la especificada como se observa en la figura 1. Los datos de ensayos realizados indican que la resistencia está disponible en la estructura terminada y no es únicamente un fenómeno de laboratorio.

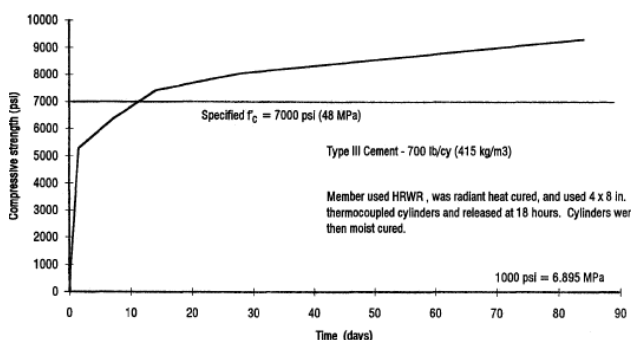


Figura 1. Aumento de la resistencia del hormigón con la edad. Fuente: [1].

Debido a esta resistencia adicional, la resistencia del hormigón va más allá de los 28 días. Debido a que algunos elementos estructurales no necesitan alcanzar su plena resistencia hasta bien pasados los 56 días, la resistencia del hormigón a los 56 días es una posibilidad pragmática.

Los elementos de hormigón de alta resistencia tienen mejoras de rendimiento significativas que se produce, en algunos casos, a expensas de un mayor valor de pretensado. El pretensado adicional aumenta el requisito de resistencia inicial del hormigón en la transferencia y comienza un ciclo de demanda creciente de más resistencia del hormigón.

Además del aumento de la resistencia, las vigas de hormigón pretensado de alta resistencia muestran excelentes características de durabilidad. Las evaluaciones de inventario de puentes de carretera indican que las vigas de hormigón pretensado superan a otros elementos estructurales para carreteras.

Se exponen a continuación las siguientes estrategias para utilizar la mayor resistencia del hormigón pretensado en obra civil:

- Aumentar los requisitos de resistencia de las vigas si una línea de vigas en un puente, por ejemplo, puede ser eliminada, de tal forma que los elementos de hormigón de alta resistencia sean más competitivos que las piezas de acero.
- Aumentar el tiempo de curado antes de la transferencia del pretensado a dos días para obtener una mayor resistencia inicial en comparación a los requisitos de resistencia de diseño.
- En puentes es interesante el uso de una combinación de hormigón de alta resistencia pretensado y postesado. El pretensado permite una mejor manipulación en planta, mientras que el postesado permite tener menos pérdidas ya que se aplica al hormigón de mayor resistencia.
- En puentes también es importante la utilización de una construcción continua, de tal forma que esta continuidad reduzca la demanda de momento en el vano medio y permite que el momento negativo sea soportado por el refuerzo en el tablero. [1]

3. ADHERENCIA DEL HORMIGÓN

La adherencia entre el hormigón y la armadura pretensa depende de tres factores principalmente, que son: la adhesión entre el acero y el hormigón, el rozamiento entre ambos y la resistencia mecánica. Se destaca que un factor importante de la adherencia es el deslizamiento relativo del acero respecto del hormigón: una vez transferido el pretensado, en los extremos del elemento se produce el deslizamiento del acero respecto del hormigón que lo rodea, en la zona de transferencia. Cuando, durante la adherencia se ha transferido la totalidad de la fuerza de pretensado, ya no hay deslizamiento relativo entre el acero y el hormigón, produciéndose entonces la compatibilidad entre ambos.

Es por esto que el uso de hormigones de altas prestaciones iniciales es muy adecuado para la fabricación de elementos pretensados de armadura pretesa, debido a que posibilita la transferencia a temprana edad. [2],[3]

4. COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES A CORTANTE Y FLEXIÓN

Para estudiar tanto el comportamiento del hormigón de altas prestaciones a cortante como a flexión se han estudiado varios ensayos con distintos tipos de vigas y un estudio numérico, respectivamente.

4.1. *Viga de hormigón autocompactante y de alta resistencia a cortante*

El hormigón autocompactante se caracteriza por la capacidad que tiene de fluir y rellenar cualquier parte de del encofrado solamente por la acción de su propio peso, sin ser necesaria una compactación por medios mecánicos.

En general, los ensayos realizados con hormigón de alta resistencia reflejan en general que la resistencia a cortante se reduce. Debido a que las formulaciones de diseño a cortante de los códigos vigentes son de carácter semiempírico se hace necesaria la verificación de seguridad y adecuación del uso de un hormigón autocompactante HAC.

El ensayo estudiado se ha realizado a vigas con sección en doble T y los resultados principales son los siguientes:

- Vigas sin armadura a cortante: se desarrollaron fisuras diagonales de forma brusca que atraviesan el alma. La primera fisura es la principal y la crítica, llegando a atravesar la cabeza de compresión. La rotura final tuvo lugar en el desarrollo de más de una fisura diagonal.
- Vigas con armadura de cortante: se desarrollaron fisuras diagonales entre el punto de aplicación de la carga y el apoyo. Al incrementar la carga se formaron más fisuras diagonales. El fallo se produjo en todas las vigas por el aplastamiento del hormigón en el alma.
- Efecto del pretensado: en las vigas sin armadura transversal y baja fuerza de pretensado, la formación de la primera fisura se relaciona con el valor del cortante último de la sección. Por otro lado, en el caso de las vigas con pretensado más alto, tras la primera fisura diagonal, la viga tiene una reserva resistente.

Finalmente, el comportamiento a cortante del hormigón autocompactante resulta un 12% mejor que el hormigón convencional.

Aunque haya una reducción de la capacidad resistente a cortante de las vigas HAC, el estudio demuestra que las formulaciones se podrían utilizar hasta resistencias de 100 MPa.

El pretensado alto da más capacidad resistente frente al esfuerzo cortante, generando más fisuras, sin embargo, reduce ligeramente la ductilidad. [4]

4.2. *Comparación vigas de hormigón de alta resistencia y de ultra altas prestaciones a flexión*

Se ha estudiado tanto la resistencia general, siendo mayor como es obvio el hormigón pretensado de ultra alta resistencia. Por otro lado se ha estudiado el comportamiento tanto a tracción como a compresión.

- Comportamiento a tracción: como se puede observar en la figura 2, las deformaciones plásticas de tracción en el hormigón pretensado de ultra altas prestaciones (HUAP-P) tienen variaciones insignificantes hasta el segundo 53 que crecen de forma significativa. En cuanto al hormigón de alta resistencia pretensado (HAR-P), las deformaciones plásticas de tracción tienen variaciones más leves hasta llegar al colapso.

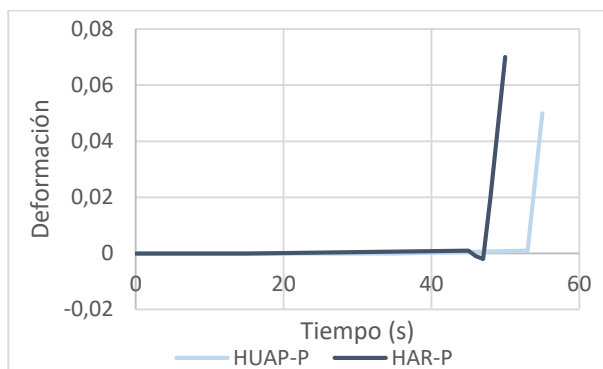


Figura 2. Comparación curva deformación plástica de tracción-tiempo. Fuente: Elaboración propia.

- Comportamiento a compresión: las deformaciones plásticas de compresión en el hormigón de ultra altas prestaciones pretensado (HUAP-P) son mayores que en el caso del hormigón de alta resistencia. La tensión máxima del último hormigón se alcanza cuando llega el colapso (60 MPa) a los 47,5 segundos.

Tabla 1. Comparación entre la tensión de compresión y el tiempo de HUAP-P y HAR-P. Fuente: Elaboración propia.

HUAP-P		HAR-P	
Tiempo [s]	Tensión [MPa]	Tiempo [s]	Tensión [MPa]
0	0	0	0
5	1,23	5	0,12
10	4,12	10	0,18
15	4,61	15	0,13
20	2,19	20	0,05
25	1,3	25	0,08
30	0,53	30	0,1
32	20,87	32	5,68
40	60,3	40	36,94
50	122,85	47,5	59,87
54	153,84	49	36,54
58	35,31	50	18,23

Se observa que el uso del pretensado en los hormigones de ultra altas prestaciones mejora su resistencia a fractura y su capacidad de deformación previa al colapso. [5]

5. APLICACIÓN

La aplicación del hormigón pretensado de alta resistencia es principalmente en obra civil, aunque también se utiliza en edificación.

El uso en edificación en viguetas hace que sean más ligeras pero tienen las mismas prestaciones que las viguetas de hormigón convencional. Se destaca que se utiliza principalmente en piezas prefabricadas. [6]

En cuanto al uso en obra civil, el estudio de estos tipos de hormigón presenta grandes ventajas como son:

- Nuevos diseños estructurales que permiten secciones más esbeltas.
- Reducción del peso propio de las estructuras.
- Mayor durabilidad, lo que permite aumentar la vida útil de la infraestructura.
- Menores tiempos de ejecución.

Sin embargo, el uso del hormigón de alta resistencia también tiene importantes desventajas a tener en cuenta:

- Mayor consumo por metro cúbico de cemento portland.
- Mayor costo por metro cúbico.
- La inexistencia de normativa local que regule y avale su uso como material para elementos estructurales. [7]

6. CONCLUSIONES

En el estudio realizado sobre las características del hormigón de alta resistencia se concluye que, estudiando la adherencia del mismo, este material es muy aconsejable para elementos pretensados de armadura pretensa. Además, su comportamiento mejorado a flexión (mejor resistencia a fractura y mayor deformación previa al colapso) lo hace un material muy competente para la construcción de vigas tanto en obra civil como en edificación.

Las vigas de hormigón pretensado de alta resistencia permiten unos beneficios económicos en forma de vanos más largos y una mayor separación entre las vigas. Por la mayor resistencia y durabilidad del hormigón se concluye además que las vigas formadas por este material que son utilizadas en puentes son muy rentables, manteniendo un alto rendimiento. Estas características además influyen en los aspectos de protección y seguridad, lo que hacen del hormigón pretensado de alta resistencia un material muy competente que será sin duda el futuro de la construcción.

Se concluye además que es necesaria la creación de una nueva normativa que regule los usos del hormigón de alta resistencia y de ultra altas prestaciones debido al carácter semiempírico de las formulaciones de la normativa vigente, lo que hace necesaria la validez de estas formulaciones para los diferentes casos.

Con la aprobación el 29 de junio de 2021 del nuevo Código Estructural por el Consejo de Ministros, así como la publicación del mismo en el Boletín del Estado el 10 de agosto de 2021 se reafirma la necesidad de una investigación mayor de este tipo de materiales, ya que no se encuentran formulaciones específicas de los hormigones de ultra altas prestaciones.

7. REFERENCIAS

- [1] Dolan C.W., Ballinger C.A. and LaFraugh R.W. High strength prestressed concrete bridge girder performance. PCI Journal (1993).
- [2] ACHE. Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural “Modelo de transferencia del pretensado: análisis comparativo”. 272-2013.
- [3] Vázquez C. Estudio comparativo de las propiedades de adherencia de cordones de pretensado en elementos prefabricados de hormigones de altas prestaciones iniciales. Tesis doctoral. Universidad de La Coruña. Diciembre, 2000.
- [4] ACHE. Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural “Comportamiento a esfuerzo cortante de vigas prefabricadas pretensadas de hormigón autocompactable de alta resistencia”. 244-2007.
- [5] Afán A. Estudio numérico del comportamiento a flexión de una viga de hormigón de ultra altas prestaciones y pretensado. Trabajo de fin de máster. Sevilla, 2020.
- [6] ACHE. Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural “Aplicación de los hormigones de altas prestaciones, a los componentes pretensados para la edificación”. 177-1990.
- [7] Céspedes B.A. Aplicación de concretos de ultra altas prestaciones a la construcción de puentes. Bogotá, Colombia, 2021.

Innovación

en Ingeniería de Caminos, C. y P.

Revista de los alumnos de Máster, ETSI Caminos, C. y P. — UCLM

Volumen 1, 2022