

JORNADAS DE INVESTIGACIÓN Y ACTUALIZACIÓN INGENIERÍA CIVIL

Volumen 1 • No 2 • Julio 2016 • ISSN 2462-8247



UNIAGRARIA
Fundación Universitaria Agraria de Colombia

LA U VERDE
DE COLOMBIA

JORNADAS DE
INVESTIGACIÓN Y
ACTUALIZACIÓN
EN INGENIERÍA CIVIL

Vol. 1 No. 3

Julio 2017

Fundación Universitaria Agraria de Colombia -UNIAGRARIA-

ISSN: 2462-8247

ASAMBLEA GENERAL

Teresa Escobar de Torres

Presidenta

CONSEJO SUPERIOR

Álvaro Zúñiga García

Presidente

Teresa Arévalo Ramírez

Teresa Escobar de Torres

Jorge Orlando Gaitán Arciniegas

Héctor Jairo Guarín Avellaneda

Emiro Martínez Jiménez

Álvaro Ramírez Rubiano

Rector

Jorge Orlando Gaitán Arciniegas

Director Unidad de Investigaciones

Alvaro Mauricio Zúñiga Morales

Decana Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas

Adriana Mejía Terán

Director del Programa de Ingeniería Civil

Carlos Javier Obando Gamboa

Director de Investigación - Programa de Ingeniería civil

Edgar Ricardo Monroy Vargas

Dirección Editorial

Sandra Edith Nossa M.

Corrección de textos

Diana Carolina Sánchez

Concepto Gráfico, Diseño, Composición e Impresión

Entrelibros e-book solutions

www.entrelibros.co

Laura García Tovar

Diseñadora

Jornadas de Investigación y Actualización en Ingeniería Civil by Fundación Universitaria Agraria de Colombia -UNIAGRARIA- is licensed under a Creative Commons Reconocimiento-NoComercialCompartirIgual 3.0 Unported License.

La publicación 'Jornadas de Investigación y Actualización en Ingeniería Civil' es producto del área de Ingeniería Civil de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia -UNIAGRARIA- impreso bajo el ISSN: 2462-8247, en idioma Español. Es un producto editorial protegido por el *Copyright* © y cuenta con una política de acceso abierto para su consulta, sus condiciones de uso y distribución están definidas por el licenciamiento *Creative Commons* (CC).



Contenido

- 0 **Análisis comparativo entre procesos de diseño y construcción de los sistemas tradicional y prefabricado de losas de entepiso para edificaciones de hasta 4 niveles**
Ph.D Edgar Ricardo Monroy Vargas, Brian Steven Sanabria Riaño
- 0 **La fidis como nueva estrategia mercantil del sector constructor**
PhD Iman Rousta, Mgtr. (C) Cristina Yanneth Barón Hernández
- 0 **Comportamiento mecánico de compuesto reforzado con fibras de chontaduro**
Ing. Juan Pablo Villate Diaz
- 0 **Comparación de los parámetros de calidad del agua, para abastecimiento de poblaciones, en un tramo del río Magdalena y la cuenca del canal de Panamá**
María Camila Veloza Aldana
- 0 **Uso de residuos de minería para agregados de construcción**
Efraín Casadiego Quintero, Nelson Joman Vargas Ortiz
- 0 **Sistema de insonorización en materiales renovables para viviendas en Bogotá**
Ramiro de Jesus Gloria Lambraño
- 0 **Falla súbita de un suelo cohesivo solicitado cíclicamente**
Patiño N. C. H., Martínez R. E., Galindo A. R.
- 0 **Polietileno de baja densidad como alternativa para mejorar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente**
Luis Coicué, Cristhian Sepúlveda, Javier García, Edwin Guerrero, Edgar Monroy, Martin Espitia
- 0 **Conexiones resistentes a momento con perfiles tubulares estructurales (pte)**
Laura L. Constain M., Jimmy Leonardo Suárez Díaz, Camila Andrea Barranco Molina
- 0 **Lean Construction: un cambio para la gestión de proyectos de obra**
Jimmy Leonardo Suárez Díaz, Camila Andrea Barranco Molina

.....

Aanálisis comparativo entre procesos de diseño y construcción de los sistemas tradicional y prefabricado de losas de entrepiso para edificaciones de hasta 4 niveles

Ph.D Edgar Ricardo Monroy Vargas

Universidad Católica de Colombia

ermonroy@ucatolica.edu.co

Brian Steven Sanabria Riaño

Universidad Católica de Colombia.

bssanabria92@ucatolica.edu.co

.....

Resumen

El uso de estructuras prefabricadas en Colombia no ha tenido un desarrollo notable. Si bien es cierto que existen empresas prefabricadoras en el país, se dedican principalmente a la fabricación de elementos como tuberías, adoquines, bordillos, mobiliario urbano, entre otros. Por consiguiente, obligan a que se ajusten los procesos de diseño y construcción a la aplicación de técnicas in situ en el desarrollo de las edificaciones. Salvo el uso de concretos bombeables y algunos adelantos importantes en formaleta, las técnicas mencionadas siguen siendo las mismas de hace unos 60 años. Luego de consultar el estado del arte referente al tema, llama la atención la poca investigación académica disponible en el país; excepto algunos trabajos de grado, las publicaciones existentes sólo ofrecen una descripción cualitativa donde se citan las propiedades y las enormes ventajas de los elementos de concreto prefabricado. Sin embargo, dichas publicaciones mantienen la incertidumbre en cuanto a costos, tiempos, procesos, etc., por ello, los diseñadores y constructores prefieren mantener sus métodos tradicionales, para evitar asumir riesgos que ante la implementación de soluciones prefabricadas. Por lo anterior, resulta beneficioso generar, a partir de casos de estudio, indicadores cuantitativos entre los procesos de diseño y construcción en sistemas tradicionales y prefabricados que sirvan de apoyo y faciliten la toma de decisiones..

Palabras clave: construcción, concreto prefabricado, concreto in situ, losa de entrepiso, indicador cuantitativo.

Abstract

The use of precast structures in Colombia hasn't had a remarkable development. While it is true, there are prefabrication companies in the country, these have been mainly dedicated to the manufacture of elements such as pipes, pavers, curbs, street furniture, among others, forcing, in the build of buildings, to adjust so processes of design as constructive to the application of techniques "in situ" and which, except for the use of pumpable concrete and some important advances in casts, these are still the same as some 60 years ago. After consulting the state of the art on the subject, draws attention the little academic research available in the country is striking; With the exception of some degree works, the existing publications only offer a qualitative description where the properties and the enormous advantages of precast concrete elements are cited, that however, maintain the uncertainty regarding costs, times, processes, etc., and by this, the designers and builders prefer to maintain their traditional methods, avoiding taking risks that they presume, they can have with the implementation of precast solutions. Therefore, it is beneficial to generate, from case studies, quantitative indicators between design and construction processes in traditional and prefabricated systems, which serve as support and facilitate decision making..

Keywords: construction, prefabricated concrete, concrete in situ, slabs, quantitative indicator.

Introducción

En la actualidad, en el país, la mayoría de estructuras para edificaciones se diseñan y se construyen con métodos tradicionales. Colombia, como un país en vía de desarrollo, necesita enfrentarse al reto de modernizarse. La innovación es la clave para construir, no solo edificaciones, sino ciudades de calidad y esta debe ser un objetivo claro de los ingenieros civiles (Camacol, 2014).

En el mundo, la construcción con elementos de concreto prefabricado transformó la lenta y artesanal construcción tradicional (Koskela, 2003); sin embargo, en Colombia las empresas constructoras se muestran escépticas ante la utilización de nuevas formas de industrialización y, por tanto, a la prefabricación. Pocas alternativas, mala calidad, costos elevados, entre otras, son las consideraciones que se le atribuyen a la construcción prefabricada, para así mantener las tecnologías de construcción actuales.

Existen en el país empresas prefabricadoras que intentan permear el mercado. No obstante, el desconocimiento de las implicaciones de usar prefabricados en la construcción de edificaciones (diseño, costos, tiempos, etc.) no ha hecho posible su implementación a gran escala.

De acuerdo con los argumentos anteriores y utilizando como caso de estudio, el diseño y construcción del entrecimpo de una edificación construida en la ciudad de Bogotá, el presente documento buscará generar indicadores cuantitativos que permitan establecer las diferencias entre elementos prefabricados y elementos construidos in situ, para así, evaluar qué sistema presenta mayor ventaja.

Desarrollo y descripción de la metodología usada

correspondientes. Para el caso B, cuando sea necesario, consideraciones, diseños, etc., serán de autoría propia.

Descripción caso de estudio

Para lograr la comparación entre los procesos de diseño y construcción de los sistemas in situ y prefabricados, se analizarán las variables que intervienen en un proyecto construido con dos casos prácticos: el caso A, con losas de entrecimpo prefabricadas tipo losa alveolar y losa maciza ; y el caso B, el mismo proyecto pero construido con métodos tradicionales, tipo losa de entrecimpo in situ nervada o aligerada..

La edificación consta de 3 niveles y un sótano; la estructura la componen columnas, vigas y un muro de contención perimetral en el sótano. Las alturas libres son de 3,54 m en sótano, 4,40 m en el nivel 1 y 3,80 m en el nivel 2 y 3. La superficie aproximada del piso tipo es de 2.600 m². La estructura corresponde a pórticos (vigas y columnas) de concreto prefabricado que resisten las cargas gravitacionales de la estructura, en conjunto con muros de concreto fundido in situ, que aportan la resistencia sísmica del edificio.

El desarrollo del caso de estudio se basará en un proyecto que se construye dentro de un importante centro empresarial ubicado en la calle 26, al occidente de la ciudad de Bogotá. Los planos e información general de este proyecto han sido cortesía de la ingeniera Ana María Suárez, ingeniera estructural de la compañía Titán Cemento. Teniendo en cuenta que la edificación está originalmente proyectada con elementos prefabricados, para el caso A se utilizará dicha información para sustentar los análisis

Metodología de evaluación caso de estudio

La evaluación se realizará a partir de la definición de cadena valor de Porter; esta consiste en una herramienta gerencial para la toma de decisiones y busca caracterizar fuentes de ventaja competitiva, identificando condiciones favorables o desfavorables dentro de un proceso en específico (Rodríguez, 2013).

Una cadena de valor está integrada por actividades primarias o fundamentales y secundarias o de apoyo; para el desarrollo del presente trabajo, se clasificarán los aspectos mencionados anteriormente, dentro de los procesos de diseño y construcción, y a su vez, estos aspectos se diferenciarán entre primarios o secundarios; serán primarios si sus resultados se consideran esenciales dentro de la ejecución de un proyecto y serán secundarios, aquellos que sirvan de apoyo a los procesos fundamentales.

Dicho lo anterior, se examinarán ciertos parámetros dentro de los procesos de diseño y construcción de losas de entrepiso, que están presentes y son comunes en ambos casos estudiados, que además, sirven de apoyo para la toma de decisiones en el momento de elegir entre un sistema constructivo u otro.

Se delimitan dos etapas generales, como son el diseño y la construcción, y a partir de estas, se indican a continuación los parámetros de análisis que permitirán concluir si un caso u otro presenta resultados positivos o negativos dentro del caso de estudio.

1. Peso de la estructura
2. Calidad de los materiales
3. Cantidad de materiales
4. Costo directo
5. Duración de actividades
6. Control de desperdicios



Figura 1. Diagrama de flujo parámetros de análisis.

Fuente: elaboración propia.

Con el fin de establecer parámetros de importancia entre los parámetros a evaluar, se acudirá al método Delphi, que es una técnica de obtención de información, soportada en la consulta a expertos de un área específica, con el fin de obtener la opinión de consenso más fiable del grupo consultado. Esta técnica, de carácter cualitativo, es usada cuando no se cuenta con información suficiente para la toma de decisiones, ante situaciones de incertidumbre

o cuando se carece de información objetiva (Reguant y Torrado, 2016).

Basados en lo anterior y en el concepto de cadena de valor, se establecen en una escala de 0 a 100%, los siguientes parámetros de importancia a los indicadores a evaluar con el objetivo de lograr conclusiones más precisas:

ACTIVIDADES SECUNDARIAS	Indicador Calidad de los materiales (I_{CM})	13.3%
	Indicador Cantidad de Concreto (I_{CC})	13.3%
	Indicador Sustentabilidad (Control de desperdicios) (I_{CD})	13.3%
ACTIVIDADES PRIMARIAS	Indicador Peso de la Estructura (I_{PE})	20.0%
	Indicador Costo Directo (I_{APU})	20.0%
	Indicador Programa de obra (I_{PO})	20.0%

Figura 2. Cadena de valor de aspectos a evaluar

Fuente: elaboración propia

Resultados y discusión

Resultados caso de estudio

loseta prefabricada y capa de compresión para el caso A y viguetas y loseta superior para el caso B.

Peso de la estructura

Se tuvo únicamente en cuenta el peso propio de cada uno de los elementos de losa para cada caso, losa alveolar,

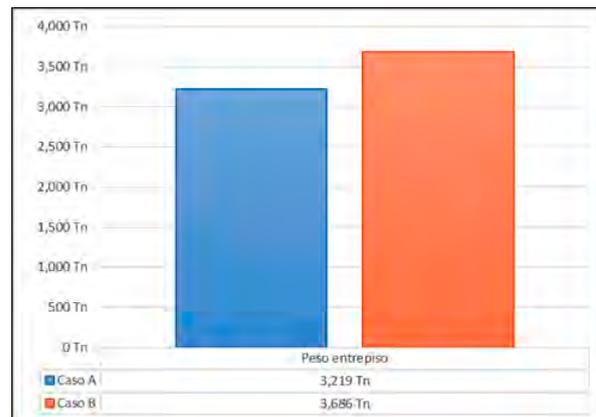


Figura 3. Comparación del peso entre casos

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, se evidencia que la estructura de entrepiso del caso B representa un 15% de mayor peso frente al caso A.

Tabla 1: Diferencia de peso entre cada caso

Item	Caso A	Caso B	Diferencia	%
Peso entrepiso	3,219 Tn	3,686 Tn	467 Tn	15%

Fuente: elaboración propia.

Calidad de los materiales

La fabricación de elementos prefabricados se realiza bajo estrictos controles de calidad. Las fábricas de prefabricados tienen la posibilidad de elaborar sus propios concretos, incluyendo así, este proceso dentro de su plan de calidad

permitiendo además, alcanzar resistencias a la compresión mayores a las de un concreto elaborado en obra e incluso, a las que se consiguen en el mercado.

Se presenta a continuación las consideraciones de resistencia a la compresión del concreto para cada caso.

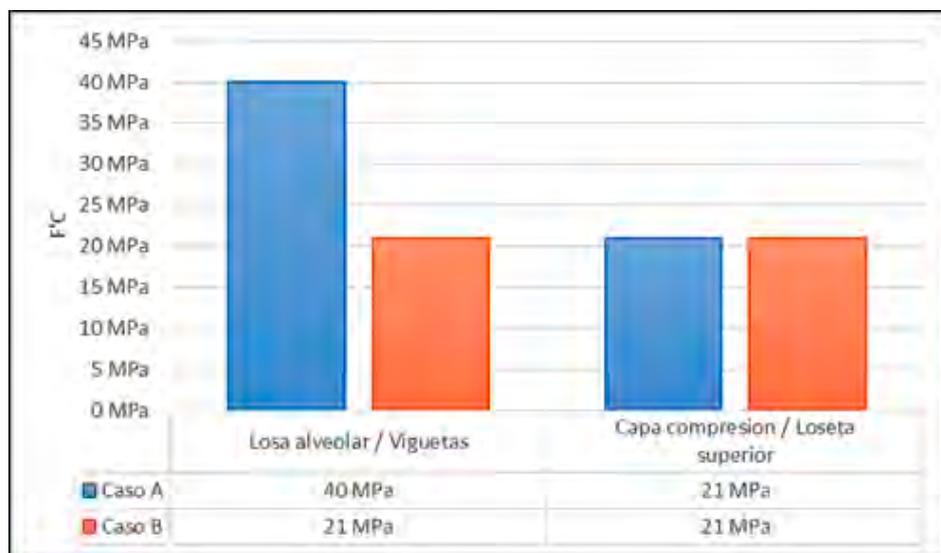


Figura 4. Comparación de $f'c$ entre casos.

Fuente. Elaboración propia

Tabla 2: Diferencia de $f'c$ en cada caso

Caso	Losas alveolares / Viguetas	Capa de compresión / Loseta superior
Caso A	40 MPa	21 MPa
Caso B	21 MPa	21 MPa
Diferencia	-19 MPa	0 MPa
%	-48%	0%

Fuente: propia del autor

La resistencia a la compresión de los elementos estructurales, viguetas para el caso B es un 48% menor frente a la losa alveolar y loseta prefabricada para el caso A.

La capa de compresión *in situ* del caso A, requerida para lograr la transferencia de fuerzas horizontales por la acción del diafragma, se diseña con una $f'c$ a los 28 de 21MPa, teniendo en cuenta que es un concreto que se elaborará en obra o se comprará a un proveedor, lo anterior, no representa ninguna diferencia frente a la $f'c$ de diseño de la loseta o torta superior del caso B.

Cantidad de concreto

Una consecuencia del uso de concretos de alto desempeño ($f'c$ entre 40 MPa y 100 MPa) es la optimización de las secciones de los elementos estructurales, lo cual, se traduce en disminución de la cantidad de concreto.

El análisis de cantidad de volumen de concreto se hizo para resultados teóricos y no se tuvieron en cuenta porcentajes de desperdicio o factores de pérdida de material.

Tabla 3. Resumen volumen losa prefabricada. Caso A

Item	Área en planta	Sección transversal	Losa prefabricada
Sótano	3,277 m ²	0.11 m ³ /m ²	374 m ³
Piso 1	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Piso 2	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Piso 3	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Volumen Total			796 m³
Área total entrepiso			8,547 m²
Volumen / m²			0.09 m³/m²

Fuente: elaboración propia

Tabla 4: Resumen volumen capa de compresión. Caso A

Item	Área en planta	Seccion transversal	Capa de compresion
Sótano	3,277 m ²	0.07 m ³ /m ²	229 m ³
Piso 1	1,756 m ²	0.05 m ³ /m ²	88 m ³
Piso 2	1,756 m ²	0.05 m ³ /m ²	88 m ³
Piso 3	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Volumen Total			546 m³
Area total entrepiso			8,547 m²
Volumen / m²			0.06 m³/m²

Fuente: elaboración propia

El volumen total de concreto requerido para en el caso A, resultante de la suma del componente prefabricado

(796 m³) y la capa de compresión *-topping-* (546 m³) es de 1,341 m³.

Tabla 5. Resumen volumen viguetas. Caso B

Item	Área en planta	Seccion transversal	Viguetas
Sótano	475 m ²	0.75 m ³ /m ²	356 m ³
Piso 1	254 m ²	0.65 m ³ /m ²	165 m ³
Piso 2	254 m ²	0.65 m ³ /m ²	165 m ³
Piso 3	254 m ²	0.65 m ³ /m ²	165 m ³
Volumen Total			852 m³
Area total entrepiso			8,547 m²
Volumen / m²			0.10 m³/m²

Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Resumen volumen loseta superior. Caso B

Item	Área en planta	Seccion transversal	Loseta superior
Sótano	3,277 m ²	0.08 m ³ /m ²	262 m ³
Piso 1	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Piso 2	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Piso 3	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Volumen Total			684 m³
Area total entrepiso			8,547 m²
Volumen / m²			0.08 m³/m²

Fuente: elaboración propia

El volumen total de concreto requerido para en el caso B, resultante de la suma de las viguetas (852 m³) más la loseta superior (684 m³) es de 1,536 m³.

Tabla 7. Diferencia de volumen de concreto en cada caso

Caso	Volumen de concreto
Caso A	1,341 m ³
Caso B	1,536 m ³
Diferencia	195 m ³
%	15%

Fuente: elaboración propia

La cantidad de concreto requerida para el caso B es un 15% mayor que la requerida en el caso A. Dicho de otro modo, la influencia del concreto por superficie de entrepiso

es de 0,15 m³/m² en el caso A, mientras que en el caso B es de 0,18 m³/m².

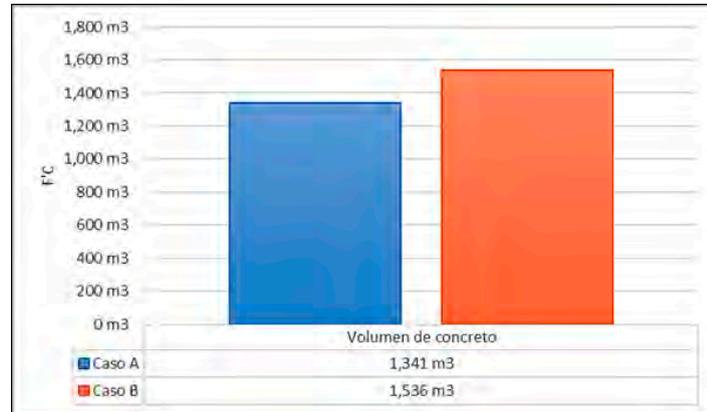


Figura 5. Comparación de volumen de concreto entre casos
Fuente: el autor

Costo directo

El factor económico es sin duda determinante al momento de definir entre sistemas constructivos; el costo directo junto al programa de obra es la base de la evaluación financiera y del análisis de inversión para cualquier proyecto.

Para el desarrollo del presente apartado, se investigaron los costos de materias primas y rendimientos de mano de obra y equipos en el mercado de la ciudad de Bogotá y, a

partir de ellos se elaboró el análisis de precios unitarios (APU).

Una vez obtenido el valor por metro cuadrado para cada caso, se obtendrá el valor total de la estructura a partir de la simple multiplicación de éste por el área total de entrepiso para la edificación que es de 8,547 m². A continuación se presenta el análisis de precios unitarios (APU) para el caso A, teniendo en cuenta que para éste se tienen dos tipos de elementos prefabricados; losa alveolar para el entrepiso del cielo de sótano y losa maciza para el piso tipo.

Tabla 8: Análisis de precios unitarios para caso A (Losa alveolar)

Descripción actividad. Suministro y colocación de losas alveolares prefabricadas de concreto pretensado, de 20 cm de canto y de 100 a 120 cm de anchura, para formación de losa de canto 20 + 7 cm, apoyada directamente sobre vigas portantes (no incluidos en este precio); capa de compresión con concreto f'c=210 kg/cm ² (21 MPa), tamaño máximo del agregado 12,5 mm, manejabilidad blanda, fabricado en planta y fundido con balde de pluma grúa; acero Grado 60 y malla electrosoldada tipo XX 159. Montaje mediante grúa telescópica.						
Insumo	Unidad	Cantidad	% perdida	Vr Unitario	Vr Total	
Materiales						
Placa alveolar prefabricada incluye transporte a obra	m2	1.00	1.00	\$ 69,544	\$ 69,544	
Malla electrosoldada	kg	2.83	1.15	\$ 2,583	\$ 8,406	
Concreto premezclado f'c 3000psi	m3	0.07	1.05	\$ 365,000	\$ 26,828	
Sub-total					\$ 104,777	
Mano de obra						
Hora cuadrilla montador	hr	0.53	1.00	\$ 22,443	\$ 11,962	
Hora cuadrilla armado acero	hr	0.25	1.00	\$ 27,240	\$ 6,810	
Hora cuadrilla encofrado y vaciado	hr	1.42	1.00	\$ 40,603	\$ 57,656	
Sub-total					\$ 76,428	
Equipo y herramienta menor						
Grúa montaje 30Tn	hr	0.27	1.00	\$ 175,000	\$ 46,638	
Tabla chapa 30x2 - 3m - Ord	un	1.00	1.00	\$ 22,906	\$ 22,906	
Herramienta menor	%	2%	1.00	\$ 181,206	\$ 3,624	
Sub-total					\$ 73,168	
Transporte						
-	vj	0.00	1.00	\$ 0	\$ 0	
Sub-total					\$ 0	
Total					\$ 254,373	

Fuente: elaboración propia

Tabla 9. Análisis de precios unitarios para el caso A (Losa maciza)

Descripción actividad. Suministro y colocación de losas maciza prefabricadas de concreto reforzado de 8 cm de canto y de 120cm de anchura, para formación de losa de canto 8 + 5cm, apoyada directamente sobre vigas portantes (no incluidos en este precio); capa de compresión con concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ (21 MPa), tamaño máximo del agregado 12,5 mm, manejabilidad blanda, fabricado en planta y fundido con balde de pluma grúa; acero Grado 60 y malla electrosoldada tipo XX 159, 25x25 cm y \varnothing 4-4 mm. Montaje mediante grúa telescópica.						
Insumo	Unidad	Cantidad	% pérdida	Vr Unitario	Vr Total	
Materiales						
Placa maciza prefabricada	m2	1.00	1.00	\$ 36,548	\$ 36,548	
Malla electrosoldada	kg	2.83	1.15	\$ 2,583	\$ 8,406	
Concreto premezclado $f'c$ 3000psi	m3	0.05	1.05	\$ 365,000	\$ 19,163	
Sub-total					\$ 64,117	
Mano de obra						
Hora cuadrilla montador	hr	0.53	1.00	\$ 22,443	\$ 11,962	
Hora cuadrilla armado acero	hr	0.25	1.00	\$ 27,240	\$ 6,810	
Hora cuadrilla encofrado y vaciado	hr	1.42	1.00	\$ 40,603	\$ 57,656	
Sub-total					\$ 76,428	
Equipo y herramienta menor						
Grúa montaje 30Tn	hr	0.27	1.00	\$ 175,000	\$ 46,638	
Tabla chapa 30x2 - 3m - Ord	un	1.00	1.00	\$ 22,906	\$ 22,906	
Herramienta menor	%	2%	1.00	\$ 140,546	\$ 2,811	
Sub-total					\$ 72,354	
Transporte						
--	vj	0.00	1.00	\$ 0	\$ 0	
Sub-total					\$ 0	
Total					\$ 212,900	

Fuente elaboración propia

Según lo anterior y para un área total de 8,547m² el costo directo del caso A será de \$1,955 millones COP.

Tabla 10. costo directo total caso A

Item	Área en planta	Valor / m ²	Valo Total
Sótano	3,277 m ²	\$254,373	\$833,623,189
Piso 1	1,756 m ²	\$212,900	\$373,947,967
Piso 2	1,756 m ²	\$212,900	\$373,947,967
Piso 3	1,756 m ²	\$212,900	\$373,947,967
Total			\$1,955,467,088

Fuente: elaboración propia

Dentro del análisis de precios unitarios del caso B, se tendrán en cuenta tanto viguetas como loseta superior.

Tabla 11, Análisis de precios unitarios para caso B

Descripción actividad. Losa aligerada de concreto armado con casetón recuperable, realizado con concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ (21 MPa), tamaño máximo del agregado 12,5 mm, manejabilidad blanda, fabricado en planta; acero Grado 60 ($f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$); nervios de concreto "in situ" de 15 cm de espesor, capa de compresión de 8cm de espesor, con armadura de reparto formada por malla electrosoldada tipo XX 159.						
Insumo	Unidad	Cantidad	% perdida	Vr Unitario	Vr Total	
Materiales						
Acero corrugado fig. 1/4" a 1"	kg	2.40	1.02	\$ 2,202	\$ 5,387	
Alambre negro recocido	kg	0.06	1.02	\$ 3,032	\$ 185	
Malla electrosoldada	kg	2.83	1.05	\$ 2,583	\$ 7,675	
Caseton icopor reutilizable	m3	0.52	1.00	\$ 72,430	\$ 37,722	
Concreto premezclado $f'c$ 3000	m3	0.18	1.05	\$ 365,000	\$ 68,874	
Desmoldante	kg	0.32	1.10	\$ 17,106	\$ 6,021	
Sub-total					\$ 125,865	
Mano de obra						
Hora cuadrilla encofrado y va	hr	0.45	1.00	\$ 22,713	\$ 10,221	
Oficial obra negra	hr	0.20	1.00	\$ 13,633	\$ 2,727	
Ayudante obra negra	hr	0.20	1.00	\$ 9,080	\$ 1,816	
Hora cuadrilla armado acero	hr	0.05	1.00	\$ 16,332	\$ 817	
Sub-total					\$ 15,580	
Equipo y herramienta menor						
Sistema de encofrado - Incluye	m2	1.00	1.00	\$ 39,400	\$ 39,400	
Herramienta menor	%	2%	1.00	\$ 141,446	\$ 2,829	
Sub-total					\$ 42,229	
Total					\$ 183,675	

Fuente: elaboración propia

El valor por m² de losa en el caso B es de \$183,675 para el área total de 8,547 m² el costo directo total será de COP \$1,570 millones.

El índice de costo por m² resulta de la relación del valor total de la estructura de entre el área total de la edificación

Tabla 12. Diferencia del costo por m² entre casos

Caso	Area	Costo Total	Indice \$ por m ²
Caso A	8,547 m ²	\$1,955,467,088	228,803 \$/m²
Caso B	8,547 m ²	\$1,569,778,754	183,675 \$/m²
Diferencia			-45,128 \$/m²
%			-20%

Fuente: elaboración propia

El índice de costo por m² del caso B es de un 20% menos frente al caso A.

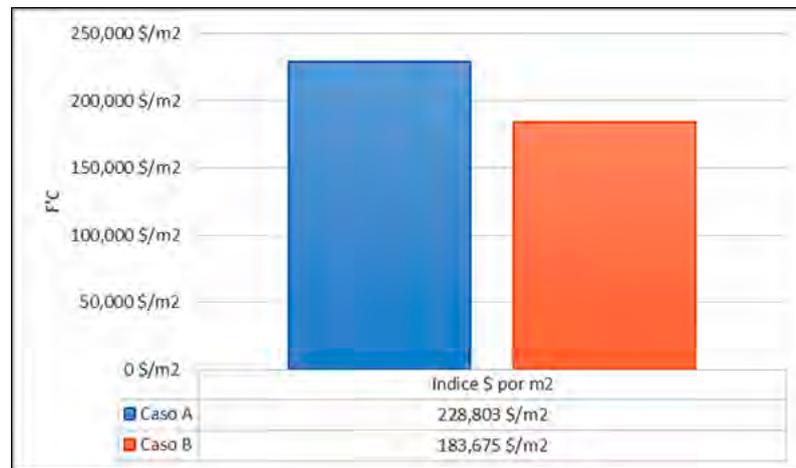


Figura 6. Comparación del costo directo por m²

Fuente: elaboración propia

Programa de Obra

El componente tiempo es una de las consideraciones más importantes dentro de un proyecto de construcción; la fecha final de entrega afecta los costos indirectos, pues una mayor duración de la obra aumenta los gastos generales y los gastos administrativos, por otro lado, posponer la puesta en servicio de una edificación puede implicar gastos adicionales o pérdidas económicas para inversionistas.

Los programas de obra se pueden diferenciar en programas de fabricación, transporte y montaje para el caso A y programas de construcción para el caso B.

Para el desarrollo de este componente, se acudió a fabricantes de prefabricados y a constructores con presencia en el mercado local. Se limitará para ambos casos, al análisis de los elementos de entrepiso. Demás actividades, como actividades preliminares, columnas, vigas, acabados, etc., no se tendrán en cuenta.

La fabricación de elementos prefabricados, corresponde a disponibilidad de pistas, moldes, ritmo de

producción y requerimientos de fabricación de la empresa o planta de prefabricados. Así mismo, como se trata de una actividad que no se ejecuta dentro del proyecto, la responsabilidad de la obra se limita únicamente a la suficiente antelación de pedido o de orden de compra. Dicho lo anterior, no resulta comparable incluir la fabricación de las losas prefabricadas dentro del presente estudio.

Se asume que la estructura de vigas portantes, sobre la que se instalará cada losa, se encuentra terminada y lista para el montaje de los prefabricados. Se consideran 8 horas de trabajo diario y de acuerdo con las investigaciones de empresas prefabricadoras el rendimiento de instalación es de aproximadamente 15 losas al día. La anterior consideración es válida, siempre y cuando se trate de losas de las mismas dimensiones.

Para el caso A, en general, se tienen losas con idénticas dimensiones. Para el ejercicio de la duración de montaje en el presente caso, se consideran losas de medidas de 1,20 m de ancho por 7,50 m de longitud.

Tabla 13. Duración actividades caso A

Item	Horas trabajo diario	Rendimiento diario (un)	Rendimiento diario (m ²)	Área	Duración total (días hábiles)
Montaje losa alveolar	8 Hr/día	15 un	135 m ² /día	3,277 m ²	24 días
Montaje losa maciza	8 Hr/día	15 un	135 m ² /día	5,269 m ²	39 días
Capa de compresión	8 Hr/día		120 m ² /día	8,547 m ²	71 días
Total elementos prefabricados					63 días
Área total					8,547 m ²
Índice área instalada por día					135 m²/día

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, la duración del montaje de los elementos prefabricados será de 63 días hábiles.

Teniendo en cuenta que los elementos prefabricados son pretensados, luego de ser ejecutados generan una contra flecha en su longitud, razón por la cual el vaciado de la capa de compresión se debe hacer inmediatamente después de instalar las losas prefabricadas, contemplándose este tiempo, dentro de la duración de actividades del caso A mencionada en el párrafo anterior.

Con el caso B, luego de investigar el mercado local, se obtiene que el rendimiento de construcción de

entrepiso con losa aligerada es de aproximadamente 500 m² por semana, incluyendo el tiempo entre el vaciado de una losa y el encofrado de la losa del siguiente nivel. La anterior consideración aplica para entrepiso con una configuración en planta regular como la que tenemos para el caso B.

Considerando 6 días de trabajo a la semana, a continuación se presenta el análisis de duración de actividades para la losa de entrepiso tradicional.

Tabla 14. Duración actividades caso B

Item	Rendimiento semana (m ²)	Días trabajo semanal	Rendimiento diario (m ²)	Área	Duración total (días hábiles)
Losa Sótano 1	500 m ² /sem	6 días/sem	83 m ² /día	3,277 m ²	39 días
Losa Tipo	500 m ² /sem	6 días/sem	83 m ² /día	5,269 m ²	63 días
Total					103 días
Area total					8,547 m ²
Indice area instalada por día					83 m²/día

Fuente: elaboración propia

La finalización de entrepiso en el caso B tarda 103 días, lo cual significa un 62% más que lo que

demoraría la ejecución del entrepiso usando elementos prefabricados.

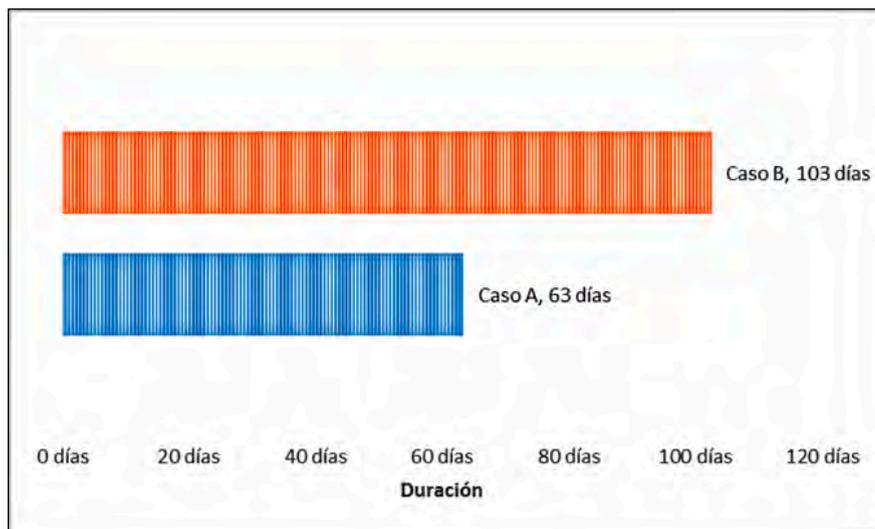
Tabla 15. Comparación de la duración de actividades

Caso	Area	Duración
Caso A	8,547 m ²	63 días
Caso B	8,547 m ²	103 días
Diferencia		39 días
		%
		62%

Fuente: elaboración propia

La anterior comparación se realizó con base en en la suposición que para ambos casos se tienen condiciones climáticas óptimas (tiempo seco) y, aunque si bien es cierto

este factor no afecta la ejecución de actividades para el caso A, es importante aclararlo para mantener resultados comparables.

**Figura 7.:** Duración de actividades para cada caso

Fuente: elaboración propia

Control de desperdicios

Según datos del Green Building Council, las edificaciones emplean el 40% de los recursos no renovables, (3 billones de toneladas al año) para construcciones alrededor del planeta Green Building Council (2005).

Es ampliamente conocido que los componentes principales del concreto provienen de fuentes con recursos no renovables; con la explotación de canteras y

el uso del agua se hace necesario tener procedimientos estrictos y responsables desde la elaboración hasta el vaciado del concreto y, de esta manera, aportar al logro de construcciones ambientalmente responsables.

El desperdicio de material se define como el factor de pérdida mayor que la unidad que representa una mayor cantidad de concreto usado por razones del proceso constructivo, medios de vaciado, formaletas y moldes y experticia del personal operativo.

Tabla 16. Diferencia en porcentaje de desperdicio de material

Caso	Volumen de concreto	Porcentaje desperdicio	Volumen Real	Volumen final
Caso A - Prefabricados	796 m ³	2%	812 m ³	1,384 m ³
Caso A - Topping	546 m ³	5%	573 m ³	
Caso B - Viguetas	852 m ³	5%	895 m ³	1,613 m ³
Caso B - Loseta superior	684 m ³	5%	718 m ³	
Diferencia				228 m³
%				16%

Fuente: elaboración propia

El porcentaje de desperdicio de concreto que se establece para elementos prefabricados es del 2%, para el resto de elementos capa de compresión (Caso A) y viguetas

y loseta superior (Caso B), es desperdicio de material es del 5%. Lo anterior representa una diferencia del 16% de mayor volumen final en el caso B frente al caso A.

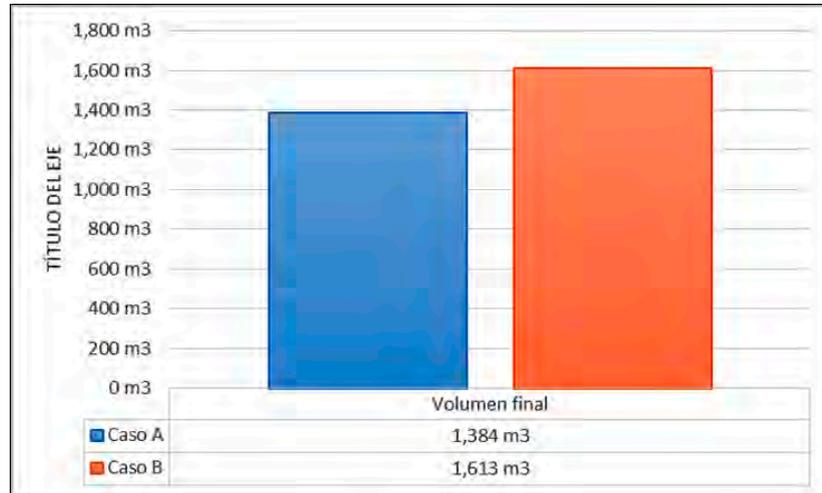


Figura 8. Comparación volumen final de concreto teniendo en cuenta % de desperdicio

Fuente: elaboración propia.

Indicadores cuantitativos

A partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior, a continuación se describirá cada parámetro definido e indicadores cuantitativos, con el objetivo de generar herramientas que faciliten la toma de decisiones.

Indicador peso de la estructura – IPE

Ante la ocurrencia de un sismo, entre más liviana sea una estructura menor será la fuerza que tendrá soportar, además, una masa muy grande se mueve con mayor brusquedad y por lo tanto transmitirá mayor exigencia a sus elementos estructurales, por otro lado, entre menor sea el peso de la estructura, menores serán las cargas gravitacionales transmitidas a la cimentación, lo cual implica un menor costo de esta.

Dicho lo anterior, a partir de la relación $\frac{\text{Peso Caso A}}{\text{Peso Caso B}}$, se establecerá que si el resultado de este cociente es menor que la unidad, se considera para el caso de estudio y que el uso de elementos prefabricados representa una condición favorable para la losa de entepiso de la edificación. Por otro lado, un resultado mayor que la unidad indicará como favorable la construcción del entepiso con métodos tradicionales, como el de una losa aligerada.

$$I_{PE} = \frac{\text{Peso Caso A}}{\text{Peso Caso B}} = \frac{3,219Tn}{3,686Tn} = 0.87$$

El valor IPE = 0,87 indica que para el caso de estudio, el uso de componentes prefabricados resulta favorable para la edificación

Indicador calidad de los materiales – I_{CM}

El uso de materiales con especificaciones exigentes, tales como el uso de concreto de alto desempeño, asegura la calidad y la alta resistencia de los elementos estructurales, garantizando así, la durabilidad del producto entregado y la protección de la inversión del usuario final de la edificación.

La relación $\frac{f'c \text{ Caso A}}{f'c \text{ Caso B}}$, proporcionará la condición de favorable al caso A, si dicho cociente es mayor que la unidad; resultado contrario sucederá, si el valor es menor que la unidad, pues este indicará que el caso B resulta de ventaja dentro de la edificación.

La calidad del concreto de la capa de compresión (Caso A) y de la loseta superior (Caso B) es el mismo, por lo cual no se tendrán en cuenta estos elementos en la evaluación del indicador I_{CM}.

$$I_{CM} = \frac{f'c \text{ Caso A}}{f'c \text{ Caso B}} = \frac{40MPa}{21MPa} = 1.90$$

El valor $I_{CM} = 1,90$, indica que para el caso de estudio, el uso de componentes prefabricados resulta favorable para la edificación.

Indicador cantidad de concreto – ICC

Mayor cantidad de material se traduce, en primer lugar, en mayor peso para la estructura, en segundo lugar, puede repercutir en mayor costo de la actividad y, por último, obliga a la administración de mayor cantidad de material (controles de calidad, aseguramiento del recurso en el momento y cantidad requeridas, etc.).

El resultado del cociente $\frac{Q \text{ Caso A}}{Q \text{ Caso B}}$, indicará que si éste es menor que la unidad, representará una condición favorable para el caso A, e igual condición para el caso B, si esta relación es mayor que la unidad.

$$I_{CC} = \frac{Q \text{ Caso A}}{Q \text{ Caso B}} = \frac{1,341m^3}{1,536m^3} = 0.87$$

El valor $I_{CC} = 0.87$, indica que para el caso de estudio, el uso de componentes prefabricados resulta favorable para la edificación.

Indicador costo directo – I_{APU}

A partir del análisis de precios unitarios elaborado para cada caso, y de la relación $I_{APU} = \frac{\text{Costo directo Caso A}}{\text{Costo directo Caso B}}$, se define que si el indicador IAPU es menor que la unidad, representará una condición favorable para el caso A, o condición positiva para el caso B, si esta relación es mayor que la unidad.

$$I_{APU} = \frac{\text{Costo directo Caso A}}{\text{Costo directo Caso B}} = \frac{\$ 228,803 m^2}{\$ 183,675 m^2} = 1.25$$

Lo anterior indica que el índice IAPU resulta favorable para el uso de sistemas tradicionales in situ.

Indicador programa de obra – I_{PO}

Reducción de los cronogramas de obra significa, sin duda, ahorro de dinero tanto en el costo del proyecto como en recuperación de dinero por parte del inversionista. Es así, que resulta muy importante definir si el componente tiempo es favorable a una u otra solución.

Dicho esto, para el indicador IPO, resultante de la relación $\frac{\text{Duración Caso A}}{\text{Duración Caso B}}$, será favorable al caso A si su valor es menor que la unidad y favorable al caso B si, su resultado es mayor que la unidad.

$$I_{PO} = \frac{\text{Duración Caso A}}{\text{Duración Caso B}} = \frac{63 \text{ días}}{103 \text{ días}} = 0.62$$

Así entonces, en el componente tiempo, el uso de elementos prefabricados resulta ser una ventaja frente al empleo de la construcción tradicional.

Indicador sustentabilidad (Control de desperdicios) – I_{CD}

El concepto de sustentabilidad es en algunos casos, ligado a un mayor costo, o por lo menos en lo que se refiere al costo directo de la obra; sin embargo, ante la problemática ambiental que vivimos y que es mundialmente conocida, el ingeniero debe eliminar de su ejercicio el uso de prácticas que sigan haciendo uso indiscriminado de los recursos naturales que dispone.

Para el presente documento, el indicador sustentabilidad se basará en el porcentaje de desperdicios de concreto que genere la aplicación de sistemas prefabricados frente a sistemas in situ.

El indicador resultará de la relación $\frac{Q_{final} \text{ Caso A}}{Q_{final} \text{ Caso B}}$, siendo favorable al caso A si esta resulta menor que la unidad y favorable al caso B si su resultado es mayor que la unidad.

$$I_{CD} = \frac{Q_{final} \text{ Caso A}}{Q_{final} \text{ Caso B}} = \frac{1,384m^3}{1,613m^3} = 0.85$$

Teniendo en cuenta el Indicador ICD = 0.85, usar elementos prefabricados resultará favorable no solo frente a los sistemas tradicionales, sino también, favorable a la construcción de edificaciones ambientalmente responsables.

Consolidación de indicadores

Se muestra a continuación, una tabla resumen con la consolidación de los indicadores evaluados.

Tabla 17. Consolidación de indicadores

Indicador	% de importancia	Valor	Condición
I _{PE}	20.0%	0.87	Favorable Caso A
I _{CM}	13.3%	1.90	Favorable Caso A
I _{CC}	13.3%	0.87	Favorable Caso A
I _{APU}	20.0%	1.25	Favorable Caso B
I _{PO}	20.0%	0.62	Favorable Caso A
I _{CD}	13.3%	0.85	Favorable Caso A

Fuente: elaboración propia

Como se observa, de los 6 indicadores analizados y para la escala establecida el uso de sistemas prefabricados representa el 80% de la escala de importancia y el 20% restante lo representan los sistemas in situ. De lo anterior, se puede concluir, como positivo el uso de elementos prefabricados frente al uso de sistemas constructivos tradicionales.

Conclusiones

Los procesos de construcción son sin duda diferentes entre ambos sistemas; los métodos in situ, a pesar de los avances en tecnología del concreto, siguen siendo artesanales, dando espacio a errores por factores humanos y manteniendo incertidumbre en el cumplimiento de plazos de construcción. Los prefabricados se ejecutan en fábricas con estrictos parámetros de calidad, con procesos industrializados que finalizan con actividades de transporte y montaje con requerimientos de mano de obra y equipos mínimos.

Los indicadores del caso de estudio que resultaron de la presente investigación, permiten establecer qué sistema

resulta de mayor ventaja entre los casos A y B; además, proporcionan en términos de orden por magnitud, la relación de cada aspecto frente a cada sistema, si se quisieran evaluar por separado.

El resultado de la evaluación de los indicadores cuantitativos de comparación: peso de la estructura (IPE), calidad de los materiales (ICM), cantidad de concreto (ICC), programa de obra (IPO) y el indicador de sustentabilidad (ICD), permiten establecer que el uso de elementos prefabricados es una solución óptima en la construcción de losas de entrecimso. Únicamente la evaluación del indicador de costo (IAPU) concluye que el uso de sistemas in situ es favorable frente al uso de prefabricados.

Con los criterios evaluados se evidencia que el uso de elementos prefabricados en la construcción de losas de entrecimso es ampliamente más favorable que el uso de sistemas de losas aligeradas; si bien es cierto, han sido pocas las investigaciones y estudios de la temática de esta investigación, los resultados en cuanto a mejoramiento de diseños, calidad de las construcciones, cumplimiento

de plazos y aporte a la sustentabilidad obtenidos en el presente documento suponen un panorama positivo para la aplicación de elementos prefabricados en la construcción,

El país cuenta con los medios para ejecutar construcciones prefabricadas, existen empresas en el mercado intentando hacerse un lugar, garantizando tecnología, calidad, presupuestos cerrados y cumplimiento de plazos. Haría falta más divulgación y el ajuste de las normas vigentes, para darle lugar al prefabricado como un elemento tan confiable como los que se utilizan en la actualidad.

Bibliografía

- American Concrete Institute. (2014). Chapter 4 — Structural Systems Requirements. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-S14, and "Commentary". ACI 318RS-14)*. (pp. 58) Farmington Hills, Estados Unidos: American Concrete Institute.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Título C – Concreto estructural. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá D.C.: Diario Oficial.
- Cámara Colombiana de Comercio. 2014. Noticias: *Cámara Colombiana de la Construcción*. Extraído el <https://camacol.co/noticias/innovación-clave-para-la-competitividad-del-sector-de-la-construcción>.
- Carreño, A. D. (2015). *Estudio de la prefabricación en concreto reforzado y su influencia en la construcción de estructuras en Colombia*. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Koskela, L. (2003). *Is structural change the primary solution to the problems of construction?* (pp. 85-96). Watford, Inglaterra: Journal Building Research & Information.
- Pasquire, C., Gibb, A. y Blismas, N. (2005). *What Should You Really Measure If You Want to Compare Prefabrication with Traditional Construction?* Kenley, Inglaterra: Rusell, 2005. 1877040347.
- Prexast/Prestressed Concrete Institute. (2010). *Floors and Roofs*.
- Reguant A. M. y Torrado F.M. (2016). *El método Delphi*. Barcelona: Reire. 2013-2255.
- Rodríguez C.W. 2013. *Gerencia de Construcción y del tiempo-costo*. Lima: Macro E.I.R.L. 978-613304-102-1.
- U.S. Green Building Council (USGBC). (2005). *An Introduction to the U.S. Green Building Council and the LEED Green Building Rating System*. Washington, DC: s.n. American Concrete Institute. (2014). Chapter 4 — Structural Systems Requirements. En *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-S14, and "Commentary". ACI 318RS-14)* (pp. 58). Farmington Hills, Estados Unidos: American Concrete Institute
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Título C – Concreto estructural. En *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá: Diario Oficial.
- Building Officials Code Administrators International. (2000). *International Building Code*. C.E.E.I Galicia, S. *Como realizar un estudio de mercado*. Santiago de Compostela: CEEI Galicia.
- Cámara Colombiana de la Construcción Camacol. (2014). *Noticias*. Recuperado en 2017 <https://camacol.co/noticias/innovación-clave-para-la-competitividad-del-sector-de-la-construcción>
- Carreño, A. D. (2015). *Estudio de la prefabricación en concreto reforzado y su influencia en la construcción de estructuras en Colombia*. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Casanova, S. L., & Rodriguez, P. (2012). *Caracterización física de ligantes asfálticos con base para mezclas tibias*. Bogotá D.C.:
- Díaz, H. (s.f.). *Tesis estudio de mercado*. Recuperado el 11 de Mayo de 2017, de http://www.academia.edu/8632318/tesis_estudio_de_mercado

- Dvoskin, R. (2004). *Fundamentos de Marketing: Teoría y Experiencia*. Buenos Aires: Granica S.A.
- Fernández, Á. (2004). *Investigación y técnicas de mercado*. Madrid, España: ESIC.
- Ferré, J. & Ferré, J. (1997). *Los Estudios de Mercado*. Madrid: Díaz de Santos.
- Grupo de Trabajo de Promoción de la ICN. (2010). *Manual de Buenas Prácticas para la elaboración de Estudios de Mercado*. Estambul.
- Ho, S., Ronaca, C., Klassen, K., Barkley, L., Macleod, D., & Zanzotto, L. (2006). Study of recycled polyethylene materials as asphalt modifiers.
- Koskela, L. (2003). *Is structural change the primary solution to the problems of construction?* Watford, Inglaterra: Journal Building Research & Information
- Marovi817. (21 de Agosto de 2012). *Guía de apoyo al emprendedor*. Recuperado el 11 de Mayo de 2017, de Slideshare: <https://es.slideshare.net/marovi817/libro-estudio-de-mercado>
- Melguizo, M. (2007). *Cómo escribir un artículo científico*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Moreno, L. (17 de Junio de 2010). *Economía en el Nacional*. (Economía Política) Recuperado el 14 de Mayo de 2017, de <http://economyapoliticaweb.blogspot.com.co/2010/06/clase-9-teoria-del-consumidor-y-del.html>.
- Nieves, J. & Carreño, J. (2015). *Estudio del efecto de aditivos reductores de temperaturas*. Bogotá D.C.
- Orjuela, S., & Sandoval, P. (2002). *Guía del Estudio de Mercado para la Evaluación de Proyectos*. Santiago de Chile
- Pasquire, C., Gibb, A., & Blismas, N. (2005). *What Should You Really Measure If You Want to Compare Prefabrication with Traditional Construction?* Kenley: Rusell.
- Precast/Prestressed Concrete Institute. (2010). *Floors and Roofs*.
- Ramirez, M. (2011). *Pavimentos con polímeros reciclados*. Envigado, Colombia.
- Reguant, M., & Torrado, M. (2016). *El método Delphi*. Barcelona: Reire.
- Rodríguez, W. (2013). *Gerencia de Construcción y del tiempo-costo*. Lima: Macro E.I.R.L
- Segura, J. (2011). *Estructuras de Concreto I*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia
- U.S. Green Building Council (USGBC). (2005). *An Introduction to the U.S. Green Building Council and the LEED Green Building Rating System*. Washington, DC.

.....

La fidis como nueva estrategia mercantil del sector constructor

PhD Iman Rousta.

Yazd University. Irán

irousta@yazd.ac.ir

Mgtr. (C) Cristina Yanneth Barón Hernández

Universidad Santo Tomás. Colombia

cristinabaron@usantotomas.edu.co

.....

Resumen

El sector de la construcción si bien tiene un carácter privado, se encuentra íntimamente relacionado con el sector público en lo que respecta a los instrumentos normativos para el desarrollo de las actividades propias de la construcción de edificaciones. Al presentar en los últimos años un importante crecimiento económico en el país, las empresas constructoras han acudido a esquemas inmobiliarios con una regulación legal en Colombia, que resulta insuficiente para el desarrollo del sector, comportando problemas tanto para constructores como para consumidores, sin formación e información suficiente para la toma de decisiones. De este modo la actual regulación legal en Colombia del esquema inmobiliario: Figura Internacional de derecho fiduciario (FIDIS), permite ampliamente la recepción de fondos y claramente comporta una serie de riesgos para el consumidor.

Palabras Claves: FIDIS, construcción, consumidor, fiduciario, Colombia

Abstract

The construction sector, although it has a private nature, is closely related to the public sector with respect to the normative instruments for the development of the activities inherent to the construction of buildings. By presenting in recent years a significant economic growth in the country, construction companies have resorted to real estate schemes with a legal regulation in Colombia, which is insufficient to the development of the sector, leading to problems for both builders and consumers, without training and enough information to make decisions.

In this way, the current legal regulation in Colombia of the real estate scheme FIDIS or international fiduciary law figure, allows the reception of funds widely and clearly involves a series of risks for the consumer.

Keywords: FIDIS, construction, consumer, fiduciary, Colombia

Introducción

La construcción es a nivel nacional uno de los principales sectores de crecimiento exponencial y en los últimos 4 años ha incrementado su valor agregado en un 28%, el doble del promedio nacional, así mismo el producto interno bruto (PIB) edificador ha registrado en el cuarto trimestre de 2015 un 6,8% el doble del crecimiento de la economía en este periodo y a febrero de 2016, el sector generó en promedio 61 mil empleos directos y 122 mil en actividades inmobiliarias, aportando el 42% a los nuevos puestos generados en el país. (Camacol, 2016).

Ante este crecimiento, el sector de la construcción específicamente inmobiliario, ha acudido a esquemas que no se limitan a unos pocos inversionistas sino que ahora concurren a él miles de personas; ergo, era posible entender que este financiamiento dirigido al público en general con el propósito de captar dineros podía tener el tratamiento jurídico contemplado en la Ley 964 de 2005 y disposiciones complementarias. Más aún, si los FIDIS cumplen los requisitos para catalogarse como valor¹, esto es, que se trate de un derecho de naturaleza negociable, en este caso por cesión, que haga parte de una emisión, cuando tenga por objeto o efecto la captación de recursos del público.

Nótese que por efectos del patrimonio autónomo y el principio de separación patrimonial establecido en la ley nacional, la fiduciaria como vocera solo responde en principio con cargo y hasta la concurrencia de los fondos depositados en el fideicomiso, de suerte que, si no se generan rendimientos ni se logran las utilidades esperadas, la fiduciaria no está en la obligación de inyectar de su presupuesto el dinero faltante para cumplir la expectativa del negocio, pues el titular del derecho fiduciario contenido en la FIDIS: Figura Internacional de Derecho Fiduciario Inmobiliario prácticamente se vuelve inversionista, trasladando consigo las contingencias de pérdida.

Claramente, la diferencia que se desprende a partir del esquema de oferta pública de valores frente a la FIDIS actual, es que el deber de información contemplado en la Ley 1328 de 2009 y la circular básica jurídica C.E. 007 de 1996 emitida por la Superintendencia Financiera de Colombia, se vuelve superlativo, y en ese sentido lo exigible es que la entidad financiera asuma su deber de asesorar, cuyo rigor es mucho más profundo que la simple información.

Sin perjuicio de lo anterior, la Superintendencia Financiera de Colombia por razones formales o interpretativas no ha reconocido los FIDIS como valor; la consecuencia de esta ausencia de intervención del Estado es que el ciudadano del común, quien por lo general no tiene conocimiento de las reglas de la economía no se queda con casuficiente información o los elementos de juicio necesarios para decidir si le conviene a sus intereses o no, la inversión en estos esquemas fiduciarios y compromete de forma incauta sus recursos.

Amén de lo expuesto, las sociedades fiduciarias no están obligadas a documentar ni certificar que brindaron la suficiente asesoría e información al cliente potencial previo a su vinculación; por lo cual, muchos de estos proyectos de construcción están amparados en la ingenuidad del público y la pasividad del control estatal, que en últimas, ha legitimado una práctica de las empresas constructoras de *crowdfunding* inmobiliario, dejando de lado los riesgos de la parte débil de la relación comercial en donde el inversionista no profesional carece de herramientas para dar un consentimiento pleno frente a las obligaciones que asume en esta clase de estructuras jurídicas.

¹ La oferta pública de valores tiene dos presupuestos: (i) se dirige al público en general o (ii) a 100 o más inversionistas determinados, con el propósito de captar recursos del público. Los valores que se ofrezcan públicamente deben estar registrados en el Registro Nacional de Valores y Emisores (RNVE) y la oferta requiere la autorización previa de la Superintendencia Financiera de Colombia (SFC).

Metodología

Esta revisión bibliográfica tomó como referencia inicial el estado actual del manejo jurídico de las fiducias nacionales y el análisis del nuevo esquema FIDIS manejado por las empresas constructoras colombianas, como la actual figura inmobiliaria para la administración de recursos de grandes proyectos en el país. Se consultó de igual manera jurisprudencia de la Corte Suprema de Justicia, laudos arbitrales, circulares de la Superintendencia Financiera, bases de datos y bibliografía especializada para fundamentar conceptualmente y establecer la naturaleza jurídica de la figura FIDIS como una nueva estrategia inmobiliaria de los proyectos de construcción en Colombia.

Desarrollo del tema

La fiducia mercantil inmobiliaria en Colombia

La fiducia en Colombia se origina a partir de la adopción del Código civil, en cuyo articulado se desarrolló la propiedad fiduciaria como una limitación al dominio, sujeto al cumplimiento de una condición para poder ser transferido a otra persona.

El negocio fiduciario mercantil como tal nace infundido en la figura norteamericana del trust, aplicada por los bancos como gestores de intereses de terceros. De este modo, es a través de la Ley 51 de 1918 que se autoriza la realización de operaciones fiduciarias a los bancos, posteriormente reglamentadas mediante la Ley 45 de 1923, que autoriza a los bancos para establecer la sección fiduciaria (Rodríguez, 2002).

Su auge data en los años 90 cuando los constructores utilizaban la fiducia mercantil como estrategia luego de la crisis económica, para reducir los riesgos asociados a la construcción, ya que podían iniciar la venta de la obra de

manera previa a la construcción (Rodríguez, 2002) y de esta forma asegurar el punto de equilibrio del proyecto, lo que trajo como resultado la acumulación de inventarios de viviendas y a la vez una caída en los precios de la finca raíz.

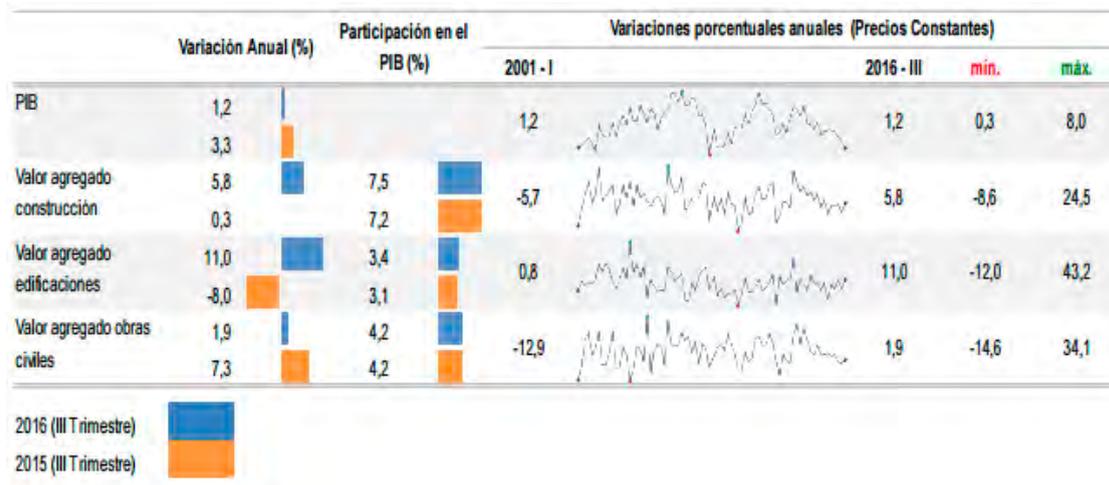
Las fiducias mercantiles inmobiliarias son desde entonces empleadas como un instrumento que garantiza la fe y confianza entre las partes para el desarrollo de un proyecto de construcción y la administración de los recursos para tal fin,; pero debido a la falta de normatividad para uso de esta herramienta se ha evidenciado inconvenientes legales con las constructoras y los usuarios finales, que se atribuyen a la falta de claridad de la información de algunos de los entes fiduciarios.

Este instrumento fiduciario viene siendo en las últimas décadas un importante aliado para el desarrollo de proyectos de construcción, con diferentes finalidades entre las que se encuentran la fiducia de administración y pagos, de tesorería y preventas; sin embargo no existe reglamentación específica, diferente a la definida de manera general para la comercialización de proyectos inmobiliarios a través del sistema financiero, así mismo para la captación de recursos y enajenación de inmuebles.

El sector de la construcción y la fiducia

El sector de la construcción en Colombia tiene un alto impacto en la economía y un incremento significativo de su Producto Interno Bruto (PIB). En el tercer trimestre de 2016, el PIB a precios constantes creció un 1,2% con relación al mismo trimestre de 2015. Al analizar el resultado del valor agregado por grandes ramas de actividad se observa el crecimiento del valor agregado del sector construcción de 5,8%. Este resultado se explica por el aumento de 11% en el subsector de edificaciones y aumento de 1,9% en el subsector de obras civiles.

Tabla 1.



Fuente: DANE. Boletín técnico. Indicadores económicos alrededor de la construcción – IEAC. III trimestre de 2016

De acuerdo con lo anterior, la gran responsabilidad que asumen los diferentes actores (Empresas constructoras, entidades fiduciarias) que intervienen en la construcción no es menor, más cuando recae en sus entidades y organismos el desarrollo de proyectos inmobiliarios conducentes al mejoramiento de las condiciones de vida de las personas, orientado por un modelo promovido por los organismos de planeación gubernamental para el crecimiento estable y ordenado de los territorios. Es entonces el compromiso de entidades públicas y privadas que intervienen en esta visión de ciudad, brindar al país una oferta que cumpla con los propósitos territoriales del país.

En los últimos años, en el desarrollo de dichas actividades, se ha denotado la necesidad de mejorar la seguridad jurídica, es así que la Cámara colombiana de la construcción establece en su informe de gestión que entre el 2015 y el 2016 se caracteriza un movimiento dinámico normativo, principalmente en temas relacionados con proyectos de vivienda segura, propiedad horizontal, programas de vivienda, y de derechos fiduciarios; en este último, la Superintendencia Financiera pretende reglamentar las operaciones realizadas a través de derechos fiduciarios para lograr mayor objetividad en el desarrollo de negocios a través de esta vía y establecer algunos

lineamientos generales que permitan salvaguardar los intereses de los implicados en materia de contratos de fiducia y administración de activos colectivos con vocación de comercialización de participaciones fiduciarias, de hecho, esta propuesta es motivo de estudio por parte de la Superintendencia.

Sin embargo, ante esta falta de normativa, es relevante cuestionar las garantías y prebendas que protegen al constructor en el ejercicio de su labor, a través de las fiducias mercantiles inmobiliarias como herramienta jurídica imprescindible para el desarrollo de proyectos de todo tipo y tamaño. Así mismo, la responsabilidad que tienen los entes fiduciarios con los proyectos y la administración pertinente y efectiva de los dineros destinados para tal fin. A pesar de que existe un marco normativo que regula este ejercicio, aún quedan vacíos legislativos en cuanto a la responsabilidad de las entidades que ejercen como administradoras de los recursos y su alcance en el ejercicio real mercantil, lo que conlleva desventajas tanto para constructores como usuarios finales.

En el mecanismo de la fiducia mercantil los bienes transferidos salen del patrimonio del fideicomitente y constituyen un patrimonio autónomo para cumplir

la finalidad contemplada en el contrato. Los bienes no pueden ser perseguidos ni embargados por los acreedores del fideicomitente, salvo cuando se den las condiciones establecidas para ejercer la acción del artículo 1238 del Código de comercio. El patrimonio autónomo como sujeto contractual y procesal puede ser sujeto de derechos y obligaciones, su vocero es la sociedad fiduciaria y puede adquirir la calidad de contratante o contratista con sus derechos y obligaciones, independientemente del fideicomitente y del fiduciario.

En Colombia el desarrollo del negocio fiduciario es producto de un proceso regulatorio poco pacífico y lleno de contrastes. Por ejemplo, en la tradición legislativa colombiana se encuentra que los primeros antecedentes de la fiducia contenidos en la Leyes 51 de 1918 y 45 de 1923 por medio de la cual se habilitaba a los bancos el ejercicio de los encargos de confianza a través de las secciones fiduciarias (concepción anglosajona derivada del trust), no guarda ninguna relación de consonancia con la concepción posteriormente establecida en el Código de comercio expedido en el año 1971.

Sobre este último referente normativo, desarrollado en los artículos 1226 a 1244 del C.Co, se advierte en cuanto al objeto de la fiducia mercantil, que ya no es un típico negocio de confianza como su predecesor, sino que el mismo responde a un esquema amplísimo, carente de rigor (a pesar de invocar la profesionalidad del fiduciario) y maleable a los intereses particulares de las partes que intervienen en el negocios (fideicomitente, fiduciario y en algunos casos el beneficiario).

Infortunadamente, este cúmulo de factores y la usanza mercantil han dado lugar a escenarios controversiales que llevan a cuestionarse sobre cuál es el alcance real de la fiducia como contrato y adicional a ello, qué responsabilidad le asiste a las sociedades fiduciarias de cara a los consumidores financieros, a los constructores y al Estado, quienes se han visto afectados por la estructuración de esquemas que desconocen directrices cardinales del ordenamiento jurídico nacional.

Discusión y resultados

Cabe reflexionar como punto principal las implicaciones que desde el punto de vista legal tiene el modelo de

inversión conocido como FIDIS a través del cual las constructoras obtienen el financiamiento de un proyecto inmobiliario valiéndose de un patrimonio autónomo, donde la fiduciaria como vocera del mismo es la encargada de recibir los recursos del público y administrarlos de manera independiente mediante su inversión en un cartera colectiva y de acuerdo a los términos del contrato de fiducia.

La noción de FIDIS popularizada en diversos proyectos inmobiliarios en realidad contiene varios elementos que requieren un análisis más riguroso, entre ellos, la contraprestación y riesgos asociados a esta práctica, los motivos que conducen al público en general a poner su capital en esta especie de negocio fiduciario y el esquema de operación avalado por el gobierno –necesidad de exigir una oferta pública de valores-.

Con relación al primer punto, vale la pena aclarar que por el hecho de vincularse a un esquema FIDIS, el inversionista no recibe ningún título de propiedad independiente o tangible del inmueble donde se adelanta el proyecto urbanístico, pues la contraprestación que se da en realidad es una alícuota de una propiedad inmobiliaria, cuya rentabilidad dependerá de la explotación del mismo y su valorización.

En ese orden de ideas, una persona que invierte sus recursos mediante FIDIS no está comprando ningún inmueble, simplemente está apalancando financieramente un proyecto del constructor y participando en la calidad de inversionista del mismo a cambio también de una rentabilidad futura. Ello significa que como inversionistas del proyecto, los ciudadanos que adquieren derechos fiduciarios en esta modalidad también se hacen responsables de las pérdidas o contingencias que se puedan presentar incluidas las derivadas de la baja o nula rentabilidad, que reporten los fondos de inversión colectiva administrados por la sociedad fiduciaria.

Bajo ese entendido, el panorama de negociación pone de presente un riesgo para los ciudadanos, que conduce a abordar el siguiente punto, esto es, las razones por las cuales las personas acuden masivamente a poner sus ahorros y activos dentro de estas figuras cuyo nivel de exposición es variable y sujeto al alea de las circunstancias del constructor.

Pues bien, un factor clave para este tipo de decisiones en el público, es el hecho de que los FIDIS estén siendo ofrecidas por conducto de un esquema administrado y respaldado a través una sociedad fiduciaria, esto es, una entidad profesional (principal rasgo de la reforma del código de comercio y la ley 45/90) vigilada por la Superintendencia Financiera de Colombia, quien *garantiza* a la gente la transparencia de la inversión de sus recursos y el desarrollo de la operación inmobiliaria.

Ciertamente, la confianza del inversionista en nuestro país tiene un factor subjetivo ligado a la institucionalidad y el respaldo que ofrece una sociedad monitoreada por los órganos de vigilancia y control del estado. Es por ello que un elemento común en la publicidad de los todos los esquemas inmobiliarios FIDIS es la continua y destacada alusión a la intermediación de las fiduciarias como administradoras de los recursos, estrategia que ha dado resultado y ha logrado que los ciudadanos inviertan con mayor seguridad y en proporciones cada vez más altas su capital en los proyectos FIDIS.

No obstante, la institucionalidad y el nombre del fiduciario NO es garantía del retorno de los recursos invertidos ni de los rendimientos que normalmente se prometen a los inversionistas en la fase de capitalización, pues el fiduciario se limita únicamente a recibir aportes, administrar en sus carteras colectivas y poner a disposición del constructor los recursos cuando es alcanzado el punto de equilibrio.

Así las cosas, si el negocio es tan abierto para la recepción de fondos y claramente comporta una serie de riesgos sobre los cuales el consumidor financiero no tiene conciencia, nos cuestionamos sobre el porqué el gobierno nacional no exigió que la estructuración de estos negocios se hiciera bajo el esquema de una oferta pública de valores².

Bajo ese entendido, el negocio fiduciario en Colombia queda sectorizado en beneficio de algunos particulares que aprovechan la inacción del Estado, apoyados además en las declaraciones de indemnidad del fiduciario quien por vía de convención se exonera de toda responsabilidad civil frente a las reclamaciones de los potenciales afectados con la ejecución del mismo.

² La oferta pública de valores tiene dos presupuestos: (i) se dirige al público en general o (ii) a 100 o más inversionistas determinados, con el propósito de captar recursos del público. Los valores que se ofrezcan públicamente deben estar registrados en el Registro Nacional de Valores y Emisores (RNVE) y la oferta requiere la autorización previa de la Superintendencia Financiera de Colombia (SFC).

Referencias

- Arrubla, J. (2007). *Abuso de la posición dominante contractual, en regulación financiera, bursátil y derechos del consumidor*. Medellín, Colombia: Biblioteca Jurídica Dike.
- Arrubla, J. (2008). *Contratos mercantiles*, tomo III, Bogotá, Colombia: Ediciones Jurídicas Dike.
- Baena, L. G., (2009). *Lecciones de Derecho Mercantil*, Bogotá D.C., Colombia: Universidad Externado de Colombia.
- Cámara colombiana de la construcción, Camacol, (2016) Boletín técnico Indicadores Económicos Alrededor de la Construcción – IEAC III trimestre de 2016.
- Cámara colombiana de la construcción, Camacol. (2008) Oficina Asesora Jurídica. Concepto Jurídico 48. Reglamentación Preventa.
- Casas, E., (2004). *Del trust anglosajón a la fiducia en Colombia y materias aledañas: reencuentro histórico y evolución técnica y jurídica desde la Ley 45 de 1923*, Bogotá D.C.: Colombia: Editorial Temis.
- Decreto N° 410. Código del Comercio Colombiano. Diario oficial 33.339, Bogotá, Colombia, del 16 de junio de 1971.
- Decreto N° 663. Estatuto Orgánico del Sistema Financiero. Diario oficial 40.820, Bogotá, Colombia, del 5 de abril de 1993.
- Gual, J. M., Villalba Cuellar, J. C. (2013). *Derecho del Consumo Problemáticas Actuales*. Bogotá D.C., Colombia: Grupo Editorial Ibañez.
- Hernández, M. P., (2011). *Guía Jurídica de los Negocios Fiduciarios en Colombia, primera edición*, Bogotá D.C., Colombia: Legis.
- Ley N° 1480. Por medio de la cual se expide el Estatuto del Consumidor y se dictan otras disposiciones. Diario oficial 48220, Bogotá D.C., Colombia, del 12 de octubre de 2011.

- Ley N° 45. Por la cual se expiden normas en materia de intermediación financiera, se regula la actividad aseguradora, se conceden unas facultades y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 19137 a 19139. Bogotá D.C., Colombia, del 6 de agosto de 1923.
- Pérez, L. (2004). *Derechos del consumidor*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Astrea.
- Rengifo, E., (2006). *La Fiducia Mercantil y Pública en Colombia, segunda edición*, Bogotá D.C., Colombia: Editorial Universidad Externado.
- Rodríguez, S., (1997). *La Responsabilidad del Fiduciario*. Bogotá D.C., Colombia: Ediciones Rosaristas.
- Rodríguez, S., (2002). *Contratos Bancarios y su significación en América Latina*, quinta edición, Bogotá D.C., Colombia: Editorial Legis.
- Rodríguez, S., (2005). *Negocios fiduciarios Su significación en América Latina*, primera edición, Bogotá D.C., Colombia: Legis.
- Superintendencia Financiera de Colombia. (2006) *Circular Básica Jurídica CE 007 de 2006*. Bogotá D.C.
- Superintendencia Financiera De Colombia. (2008) *Circular Externa 046 de septiembre de 2008*. Título V disposiciones especiales relativas a las operaciones de las sociedades fiduciarias, almacenes generales de depósito y fondos ganaderos. (pp. 10-11).
- Superintendencia Financiera de Colombia. (2016). *Circular Externa 024 de 2016*.

Referencia de tablas

Tabla 1. Nombre

Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2016) Boletín técnico. Indicadores Económicos Alrededor de la Construcción – IEAC III trimestre, Bogotá, Colombia.

Comportamiento mecánico de compuesto reforzado con fibras de chontaduro

Ing. Juan Pablo Villate Díaz
Fundación Universitaria Agraria de Colombia
villate.juan@uniagraria.edu.co

Resumen

Este trabajo presenta los resultados de un programa experimental del comportamiento mecánico de un compuesto a base de cemento reforzado con fibras de chontaduro. Se realizaron ensayos a tracción directa tanto de la fibra como del compuesto. Para el compuesto se usó una fracción volumétrica de fibra del 4%. La resistencia a tracción de la fibra resultó en valores de 190 MPa y módulo de elasticidad de 7,3 GPa. El compuesto reforzado con la fibra de chontaduro resultó con la formación una única fisura con una resistencia a tracción de 3 MPa.

Palabras clave: fibras de chontaduro, Compuesto a base de cemento, Comportamiento mecánico.

Abstract

This work presents the results of an experimental program on the mechanical behavior of peach palm fibers and cement based composites reinforced with these fibers. Additionally, the fibers were used as reinforcement in cement based composites using volumetric fractions of 5%. The tensile strength of the studied fibers varied of 190 MPa and the modulus of elasticity of 7,3 GPa. The composites presented a strain softening behavior with the formation of only one crack. The tensile strength of the composite of 3 MPa.

Keywords: Chontaduro fibers, Cement-based compound, Mechanical behavior.

Introducción

Los materiales de construcción como el acero, concreto y madera, son los componentes más relevantes en la infraestructura y presentan una alta demanda hoy en día. Aunque por los elevados costos de estos materiales y gran impacto negativo en el medio ambiente, se ha aumentado el uso de materiales sustentables como son los compuestos reforzados con fibras naturales [1]. Estos compuestos naturales pueden reducir el desecho de la industria de la construcción y aumentar la eficiencia energética al ofrecer una solución a la infraestructura en poblaciones menos favorecidas, así como promover el concepto de sustentabilidad.

Estudios sobre compuestos reforzados con fibras largas y bidireccionales, muestran que tienen una mayor resistencia a la tracción y una capacidad de absorción de energía alta con la formación de múltiples fisuras. [8] [9]. Para esto el contenido de fibra debe ser mayor que la fracción crítica. [10]. Los estudios en la interfaz de la fibra natural, con una matriz de cemento, muestran que las secciones transversales irregulares presentan altos niveles de adherencia, con valores promedio hasta de 0,92 MPa (para sisal fibras). [11]. En el caso de que se produzca una alteración en la interfaz, por ejemplo, con un recubrimiento polimérico estos valores de adherencia pueden mejorar y aumentar hasta 1,25 MPa [8].

La búsqueda de nuevos materiales sustentables han motivado este trabajo. Los autores han buscado una alternativa con fibra natural como la de chontaduro, además que esta planta tiene un crecimiento rápido. Por lo anterior, el objetivo primordial del presente trabajo es desarrollar, caracterizar y evaluar el comportamiento mecánico tanto de la fibra como del compuesto a base de cemento reforzado con fibras de chontaduro. [4] [12] [3].

Programa experimental

Las fibras de chontaduro se organizaron unidireccionalmente, en el sentido axial a la carga para que los esfuerzos a tracción estuvieran distribuidos al largo de la fibra. (ver fig. 1)

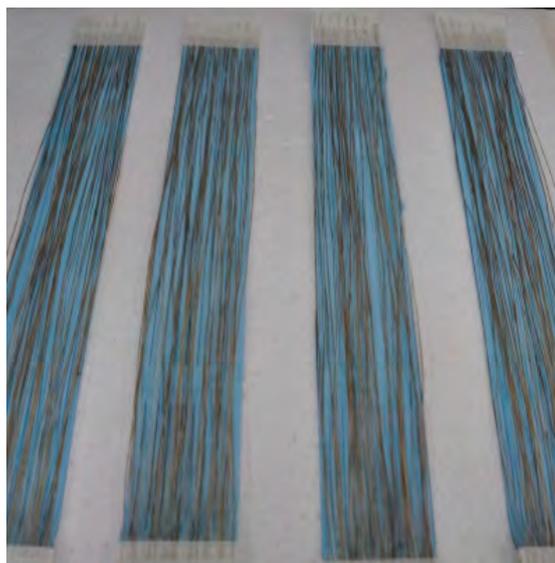


Figura 1. Ensayo a tracción directa de la fibra de chontaduro

Los ensayos de tracción directa del compuesto, se realizaron en el modelo MTS 311 con una celda de 1000 kN. La velocidad de desplazamiento fue 0,5 mm / min (Fig. 1d). Las dimensiones de cada cuerpo de prueba fueron 400

x 50 x 15 mm (longitud x ancho x espesor), se reforzaron con fibras de chontaduro unidireccionalmente con 4 capas de fibras sin tratamiento, que es equivalente a un volumen de 4% respectivamente.

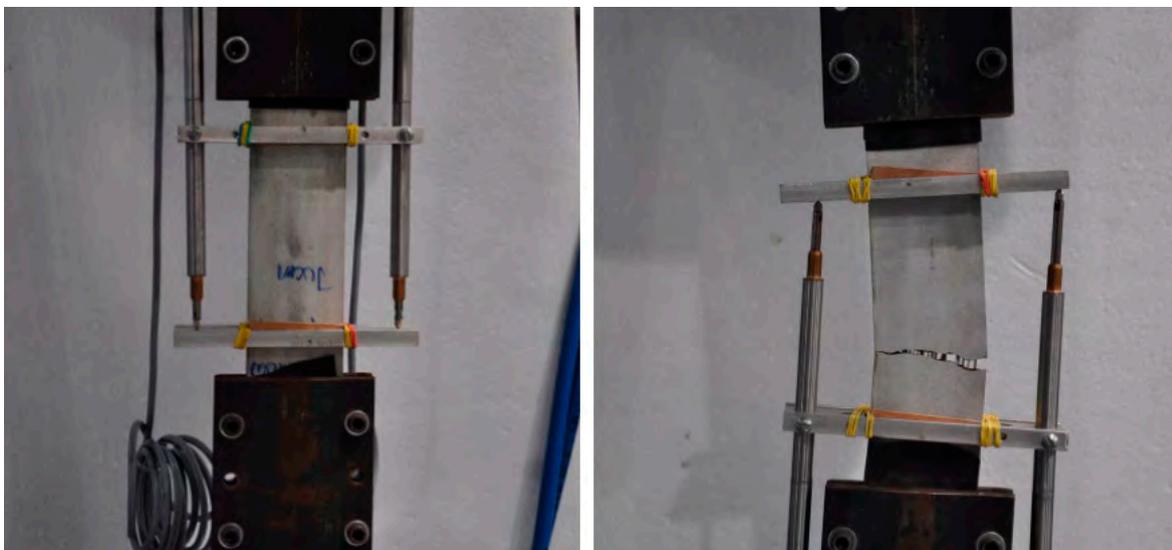


Figura 2. Ensayo de tracción directa compuesto

Resultados

La fibra de chontaduro obtuvo un módulo de elasticidad de 8 GPa y una resistencia a tracción de 190 MPa (ver tabla 1).

Tabla 1. Resultados del ensayo a tracción fibra de chontaduro

Tipo de fibra	Longitud (mm)	Área (mm ²)	Resistencia máxima a tracción (MPa)	Deformación máxima (%)	Módulo de elasticidad GPa
Chontaduro	20	0,4 ±0,04	190 ±17,8	2,8 ±0,3	7,3 ±0,8

La resistencia máxima de adherencia a la tracción de la matriz de cemento y las fibras de chontaduro es de 0,15 MPa (ver tabla 2). Otras fibras naturales tales como el sisal

presentados en los valores de los valores de hasta 0,92 MPa [11] y los valores de los valores de jute a partir de 1,25 MPa [8].

Los resultados indican que la adherencia de la fibra con la matriz es débil, comparados con otras fibras. La resistencia de adherencia (τ_{nom}) se calcula por la ecuación. (1). [14] [11]

$$\tau_{nom} = \frac{P_{max}}{\pi \phi L} \quad (1)$$

Donde P_{max} es la fuerza máxima de adherencia, L es la dimensión de inserción y es el de la medición del diámetro.

Tabla 2. Resultados del ensayo de adherencia fibra-matriz

Longitud de recubrimiento (mm)	Pmax (N)	δ (correspondiente a Pmax) (mm)	τ_{nom} (MPa)
80	27 ±6,9	2.3 ±1,7	0,15 ±0,04

Una de las consecuencias de no obtener un comportamiento dúctil conformación de múltiples fisuras, es la baja adherencia de la fibra de chontaduro con la matriz de cemento, que también se mencionó en otros estudios [15]. Se puede ver que el comportamiento mecánico del compuesto, cuando se utiliza fibras de chontaduro, la resistencia a tracción aumenta hasta una resistencia

máxima de 3,05 MPa (ver tabla 3) aunque se presente una formación de una sola fisura (ver fig.3), después existen un endurecimiento causada por la resistencia establecida por las fibras, hasta la falla de las mismas. Este comportamiento frágil, puede ser debido también a la baja fracción volumétrica de fibra en la matriz.

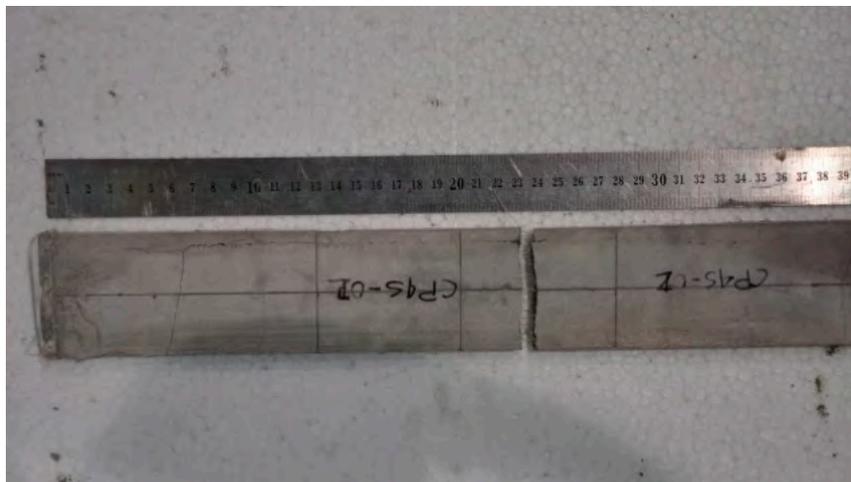


Figura 3. Formación de única fisura dentro del rango del compuesto

Tabla 3. Resultados ensayo a tracción directa de compuesto a base de cemento reforzado con fibras de chontaduro

Compuesto	Fracción volumétrica de fibra (%)	Resistencia máxima a tracción (MPa)	Deformación máxima (%)
Matriz	-	1,5 ± 0,12	0,01 ± 0,001
4 capas de fibras	5	3,05 ± 0,52	0,3 ± 0,06

Conclusiones

La fracción volumétrica de la fibra de chontaduro tiene una gran influencia en la resistencia y el módulo de elasticidad. Los resultados indican que la fibra de chontaduro se puede clasificar como una fibra con resistencia media comparada con otros tipos de fibras naturales. Los resultados muestran que la adherencia de la fibra de chontaduro con la matriz de cemento es baja, con valores de 0,15 MPa para una longitud 80 mm. El comportamiento mecánico a tracción del compuesto inició con un aumento de una única fisura, siguió con un endurecimiento y finalmente llegó a la falla del material. El comportamiento frágil del compuesto, es ocasionado por la baja de la cantidad de volumen de fibra utilizada. Por lo tanto, las fibras necesitan un tratamiento en su superficie, para aumentar su adherencia con aumento en la fracción volumétrica a la vez que se genera una formación múltiple de fisuras.

Bibliografía

- A. Silva, F. D. Mobasher, B., Soranakom, C., Filho, R. D. (2011) *Cement and Concrete Composites*. 33, 814
- Alida, A., Mazlee, M. N., Shamsul, B. J. y Kamarudin H. (2011) INSIInet Publications
- Alves, M. E., Andrade F., Dias R. (2014) *Key Engineering Materials* 600.
- Bentur, A. Mindess, S. (2006) *Fibre reinforced cementitious composites*, CRC Press.
- Dittenber D. B., GangaRao H. V. S. (2012) *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43, 1419.

University of Bristol, Bristol, United Kingdom: Board

- Farias, M. A., Farina, M. Z., Pezzin, A. P. y Silva, D. A. (2009) *Materials Science and Engineering: C*. 29, 510
- Jayamanol, G., Sreekala M.S., Thomas S. (2001) *Polymer engineering and science*. Duxford, England: Woodhead.
- Lima P. R. y Toledo R. D.. (2008) *Ambiente Construído*. 8, 7
- Mohr, B. J., Biernacki, J. J. y Kurtis, K. E. (2007). *Cement and Concrete Research*. 37, 1531
- Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Liu, Y., Yang, H. y Zeng, M. (2001). *Composites Science and Technology*. 61, 1437
- Silva, F. D., Filho, R. D., Filho, J. D. y Fairbairn, E. D. (2010). *Construction and Building Materials* 24. 777.
- Silva, F., Zhu, D., Mobasher, B., Soranakom, C. Toledo R. (2010) *Materials Science and Engineering* (pp. 527-544)
- Swift, D. G. y Smith, R. B. (1979). *Composites* 10. (pp. 145)
- Tolêdo F., Ghavami, K., England, G. L. y Scrivener K. (2003) *Cement and Concrete Composites* 25 (pp. 185)
- Toledo, R. D., Silva, F. D., Fairbairn, E. M. y Filho, A. M. (2009) *Construction and Building Materials*. 23, 2409

.....

Comparación de los parámetros de calidad del agua, para abastecimiento de poblaciones, en un tramo del río Magdalena y la cuenca del canal de Panamá

María Camila Veloza Aldana
Ing. Msc Felipe Santamaría
Universidad Piloto de Colombia, Bogotá D. C.
maria-veloza@upc.edu.co, Felipe-santamaria@upc.edu.co

.....

Resumen

En Colombia y en Panamá, existen normativas y parámetros establecidos para el control y vigilancia de la calidad del agua para el abastecimiento y el consumo humano. Estos parámetros se ven afectados por el tratamiento que reciben los cuerpos de agua, para su potabilización. En este trabajo se define y se realiza una comparación acerca de cuál es la calidad del agua en el río Magdalena, tramo La Dorada-Puerto Boyacá, y en el lago Gatún, al igual que los tratamientos que hacen las poblaciones a estos cuerpos de agua, representativos para los dos países de interés. También se determina si estos son suficientes y efectivos, de manera tal que la calidad del agua sea totalmente apta para el consumo humano y para el abastecimiento de las poblaciones.

Palabras clave: Río Magdalena, cuenca del Canal de Panamá, calidad del agua, tratamiento de potabilización, consumo humano, abastecimiento de poblaciones.

Abstract

In Colombia and Panama, there are regulations and parameters established for the control and monitoring of water quality for human supply and consumption. These parameters are affected by the treatment received by bodies of water, for its purification. This work defines and makes a comparison about the quality of the water in the Magdalena River, the La Dorada-Puerto Boyacá section, and in the Gatún Lake, as well as the treatments that the populations do to these bodies of water. , representative for the two countries of interest, and, it is determined if these are sufficient and effective, in such a way that the quality of the water is completely suitable for human consumption and for the supply of the populations.

Keywords: Magdalena River, Panama Canal watershed, water quality, purification treatment, human consumption, population supply.

Introducción

En el desarrollo de este trabajo se presentarán los parámetros y normativas establecidas, en cuanto al control y vigilancia de la calidad del agua, para abastecimiento de las poblaciones en Colombia y en Panamá. A partir de la información recolectada, se presenta una comparación de los parámetros fijados en los dos países ya mencionados y su respectivo cumplimiento, tomando como referencia dos cuerpos de agua representativos como son el río Magdalena, en el tramo la Dorada- Puerto Boyacá, y la cuenca del canal de Panamá, en el lago Gatún. De la misma manera, se presenta el respectivo tratamiento que recibe el agua para potabilización y suministro de las poblaciones adyacentes de los dos cuerpos de agua de interés para este trabajo. Por último, con la información y los resultados obtenidos se presentan los análisis y conclusiones.

Objetivos

Objetivo general

Comparar los parámetros de calidad del agua, entre el río Magdalena y el canal de Panamá, para abastecimiento.

Objetivos específicos

- Definir el cumplimiento de las normas de calidad del agua, en Colombia y Panamá, para los dos cuerpos de agua.
- Presentar los principales tratamientos del agua para potabilización utilizados en las poblaciones adyacentes a estos sistemas hídricos.

Metodología

Este proyecto será de tipo descriptivo, pues a partir de la información obtenida y a través de diferentes fuentes y referencias bibliográficas, se hará una comparación de los parámetros, leyes y normativas establecidas para la medición y vigilancia de calidad del agua en el río Magdalena, tramo la Dorada- Puerto Boyacá, y en la cuenca del canal de Panamá, en el lago Gatún. De la misma manera, se logrará establecer si la calidad del agua, de estos dos puntos de estudio, es apta para el abastecimiento y consumo de las respectivas poblaciones.

- **Fase 1:** Recolección de información de la calidad del agua del río Magdalena, en el tramo mencionado. En esta fase se indagarán diferentes fuentes y referencias bibliográficas, de lo relacionado con los parámetros y normativas, existentes en Colombia, para el control y vigilancia de la calidad

del agua que abastece las poblaciones. Así mismo, se obtendrá información acerca de la calidad del agua en el río Magdalena, tramo la Dorada- Puerto Boyacá, y los tratamientos de potabilización que se realizan para el abastecimiento a las respectivas poblaciones.

- **Fase 2:** Visita técnica al canal de Panamá. En esta segunda fase, se pretende obtener la información de las normativas y parámetros establecidos para el control y vigilancia de la calidad del agua en Panamá, así como informes recientes que muestren la calidad del agua en el lago Gatún, y los tratamientos para potabilización y abastecimiento de las poblaciones adyacentes a este cuerpo de agua.
- **Fase 3:** Analizar los datos recolectados para los dos puntos. Para cada uno de los puntos de interés de este trabajo, se realizará un análisis del cumplimiento de las normativas y parámetros establecidos para el control y vigilancia de la calidad del agua para el abastecimiento de las poblaciones.
- **Fase 4:** Presentar una comparación entre los parámetros de calidad del agua y el tratamiento para el abastecimiento, de los dos países, y establecer las respectivas conclusiones.

Resultados

El tramo la Dorada- Puerto Boyacá, del río Magdalena, hace parte de la cuenca media del mismo, y tiene una extensión aproximada de 70 km. Actualmente, la cuenca media del río Magdalena es intervenida por actividades agrícolas y ganaderas, de impacto ambiental negativo,

como la contaminación del agua por el uso excesivo de fertilizantes, que son arrastrados por las aguas lluvias.

Por otro lado, el lago Gatún, es un lago artificial ubicado en Panamá (perteneciente a la cuenca del canal de Panamá) que se creó entre los años 1907 y 1913 con la construcción de la represa de Gatún, sobre el río Chagres. Este lago es un elemento clave para el adecuado funcionamiento de las operaciones que se llevan a cabo diariamente en el canal de Panamá, pues a través de este cruzan los barcos que atraviesan el istmo por medio del canal.

El lago Gatún tiene una extensión de 425 km² y se encuentra a una altura de 26 m.s.n.m. Debido a su gran extensión, este lago sirve como fuente de abastecimiento de agua para varias plantas potabilizadoras, entre ellas, la planta potabilizadora de Sabanitas, que abastece a poblaciones como Colón, Cativá, Cristóbal, Sabanitas y Pilón.

Normativa en Colombia

En Colombia, la Resolución 2115 de 2007 es la principal normativa donde se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano³. Allí, se establecen los parámetros y características que se deben tener en cuenta para la evaluación del agua para el consumo humano y sus niveles de aceptación. Estas características incluyen las características físicas, químicas y microbiológicas y de acuerdo con estos parámetros se calcula el IRCA (Índice de calidad de agua) que es el grado de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para el consumo humano.

También, el Decreto 1575 de 2007 establece el sistema para la protección y control de calidad de agua para el consumo humano, define las características del agua para tal fin, las responsabilidades de los diferentes entes; como los Ministerios de Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, del Instituto Nacional de Salud, de las Direcciones Departamentales, Distritales y Municipales de Salud, de las personas prestadoras y de los usuarios.

³ Resolución 2115 de 2007. Ministerio de protección social, Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.

La clasificación del IRCA, se hace de acuerdo al nivel de riesgo existente, expresado en porcentaje. En la tabla 1, se muestra la clasificación de acuerdo con el porcentaje del nivel de riesgo.

Tabla 1. Clasificación de nivel de riesgo del IRCA.

Clasificación IRCA (%)	Nivel de riesgo
80,1-100	Inviabile sanitariamente
35,1- 80	Alto
14,1- 35	Medio
5,1- 14	Bajo
0-5	Sin riesgo

Fuente: Artículo 15°. Resolución 2115 de 2007

Y, en cuanto a reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico se tiene la Resolución 1096/2000 de noviembre del 2000, más conocida como RAS 2000. En esta se encuentran contenidos los manuales de prácticas de ingeniería para acueductos, potabilización, alcantarillados, tratamiento de aguas residuales, aseo urbano y aspectos complementarios de construcción de obras civiles⁴.

Calidad del agua del río Magdalena, en el tramo la Dorada- Puerto Boyacá

Según el último informe de estado de vigilancia de la calidad del agua para el consumo humano y datos correspondientes al año 2015, emitido por el Instituto Nacional de Salud, el IRCA promedio para este tramo es de 12,39%- Nivel de riesgo bajo, con IRCA de 14,78% para la Dorada y uno de 10% para Puerto Boyacá.

De acuerdo con lo establecido en la resolución 2115 de 2007, y a la información y datos obtenidos para la elaboración

⁴ Documentación técnico normativa del sector de agua potable y saneamiento básico. Ministerio de desarrollo básico.

del informe de estado de vigilancia de la calidad del agua para el consumo humano, para el departamento de Caldas, donde se encuentra el municipio de la Dorada, los porcentajes de aceptación, a nivel urbano, para algunas de las características microbiológicas estuvo por encima del 80%, al igual que el nivel de aceptación para las características fisicoquímicas

(figura 1). Y, de la misma manera, para el departamento de Boyacá, donde se encuentra el municipio de Puerto Boyacá, los porcentajes de aceptación para algunas de las características fisicoquímicas y microbiológicas, estuvieron por encima del 80% (figura 2).

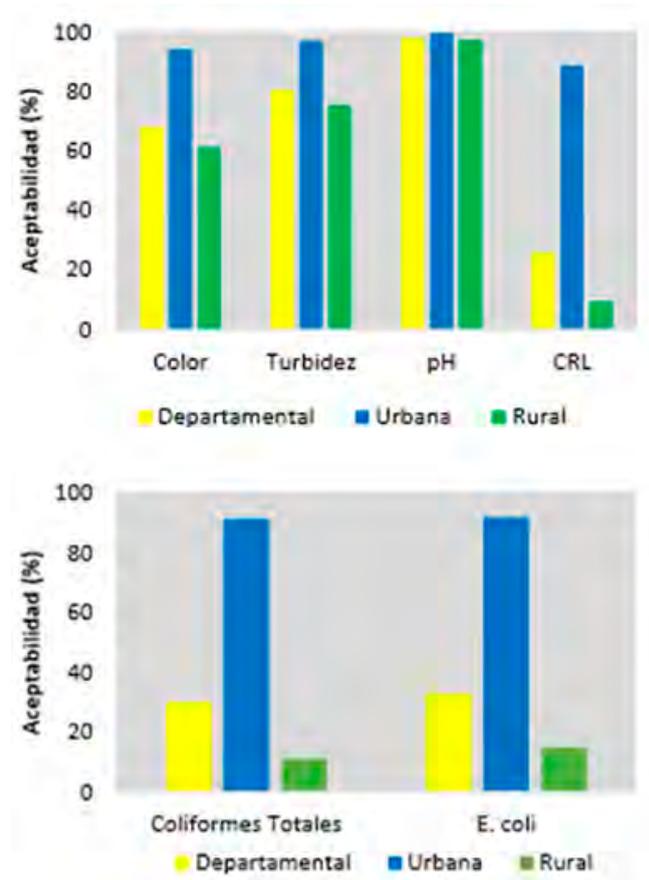


Figura 1. Aceptabilidad de características fisicoquímicas y microbiológicas en el departamento de Caldas.

Fuente: SIVICAP, Grupo de Calidad del Agua- DRSP, Instituto Nacional de Salud.

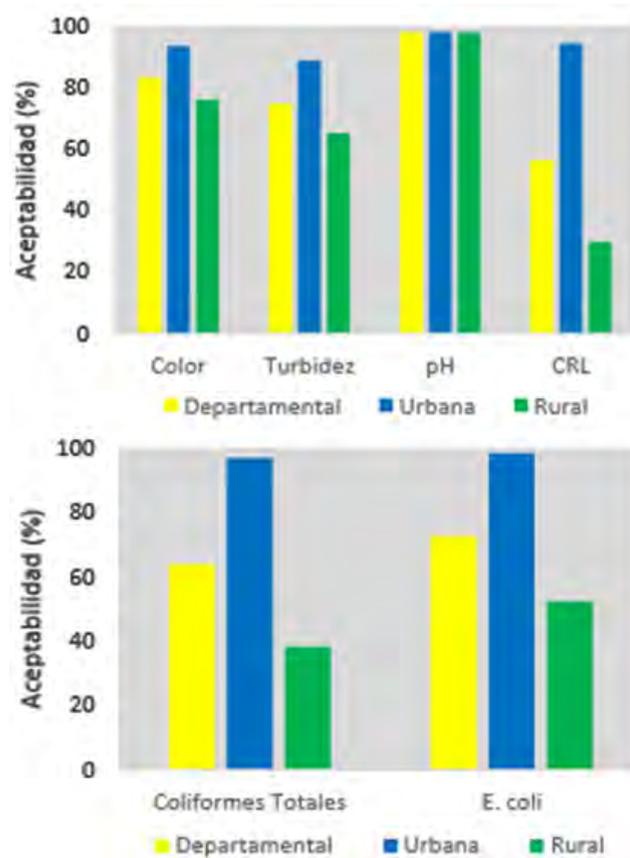


Figura 2. Aceptabilidad de características fisicoquímicas y microbiológicas en el departamento de Boyacá.

Fuente: SIVICAP, Grupo de Calidad del Agua- DRSP, Instituto Nacional de Salud.

Sistemas típicos de tratamiento del agua en la Dorada (Caldas) y en Puerto Boyacá (Boyacá)

De acuerdo con las empresas prestadoras de servicios públicos en los municipios de la Dorada y Puerto Boyacá (Empresa de Servicios Públicos de la Dorada y Empresas Públicas de Puerto Boyacá, respectivamente), estos cuentan con plantas de tratamiento de agua potable de tipo convencional, es decir, el tratamiento del agua inicia con la captación de la fuente, luego pasa por el desarenador, se realiza la aireación, medición del caudal, coagulación, filtración directa, desinfección y almacenamiento. Las plantas de tratamiento de tipo convencional deben ser de tipo modular que incorpore todas las etapas de tratamiento.

- Captación: por lo general, en el punto de captación del agua, hay una reja o malla que impide el paso o la penetración de elementos como ramas, troncos, rocas, vegetación e incluso peces.
- Desarenador: sedimenta las arenas y algunas otras partículas suspendidas en el agua.
- Aireación: la aireación del agua se realiza cuando el agua a tratar contiene hierro, pues es necesario realizar un tratamiento de oxidación previo. Esta se puede hacer mediante torres de aireación (figura 3.) o pre-cloración.



Figura 3. Torre de aireación convencional usada en plantas de tratamiento de agua potable.

Fuente: SANIAGUAS S. A. S.

- **Medición de caudal:** se debe medir el caudal de agua que entra a la planta de tratamiento luego de que este pase por el desarenador y por el proceso de aireación, pues en estos dos procesos se pierde caudal respecto al que entra en el proceso de captación. Además, es importante garantizar que la cantidad de agua sea suficiente para abastecer a toda la población.
- **Coagulación:** en esta etapa de proceso de potabilización, el agua llega a un decantador donde por la acción de coagulantes como sulfato de alúmina o cal, las impurezas y/o partículas disueltas en el agua quedan atrapadas formando coágulos que se depositan en el fondo.
- **Filtración directa:** luego de que el agua pasa por el decantador, esta llega hasta un filtro donde sigue su recorrido a través de diferentes capas de arena y grava, para que las partículas restantes se adhieran al material.
- **Desinfección:** para asegurar la potabilización del agua, se agrega cierta cantidad de cloro que elimina el exceso de bacterias y microorganismos presentes en el agua.
- **Almacenamiento:** el agua tratada se almacena en tanques de almacenamiento para su posterior distribución.

Normativa en Panamá

En Panamá, el Decreto-Ley No 2 del 7 de enero de 1997, establece el marco regulatorio e institucional para la prestación de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario. Tiene como objetivo principal garantizar la prestación de estos servicios a toda la población del país, con las adecuadas condiciones de calidad y precios asequibles.

La Autoridad del Canal de Panamá (ACP), es el ente encargado de realizar informes anuales de la calidad del agua para el abastecimiento y consumo de las poblaciones cuya fuente de abastecimiento pertenece a un cuerpo de agua de la cuenca del canal de Panamá, garantizando así el cumplimiento del objetivo estratégico 4 del canal de Panamá: “Asegurar la disponibilidad en volumen y calidad de agua para consumo y para la operación del canal”⁵.

Para evaluar la calidad del agua de esta cuenca, la ACP tiene en cuenta parámetros como: microbiológicos,

⁵ Objetivos estratégicos del canal de Panamá. Autoridad del Canal de Panamá.

nutrientes, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto e índice de calidad de agua ICA. Este índice de calidad de agua se calcula empleando el método desarrollado por la Fundación de Sanidad Nacional de los Estados Unidos de América (NSF) en el año 1970. Para este cálculo se tienen en cuenta 9 parámetros: oxígeno disuelto (%), demanda bioquímica de

oxígeno (DBO5), coliformes fecales, ortofosfatos (P-PO4), nitratos (N-NO3), potencial de hidrógeno (pH), desviación de temperatura, turbiedad y sólidos totales, cada uno de estos parámetros aporta un valor al índice de calidad del agua, y los valores totales obtenidos van de 0 a 100 y permiten calificar y clasificar el agua como se muestra a continuación:

Tabla 2. Rangos y calificaciones para los valores de ICA

Rangos	Color	Calificación
91-100	Azul	Excelente
71-90	Verde	Bueno
51-70	Amarillo	Medio
26-50	Naranja	Malo
0-25	Rojo	Muy malo

Fuente: Índices de Calidad (ICAs) y de contaminación (ICOs) del agua de importancia mundial. Universidad de Pamplona.

Además, el Ministerio de Comercio e Industrias de Panamá, expidió en enero de 1997 el *Reglamento técnico DGNT-COPANIT 23-395-99*, donde se establecen los requisitos físicos, químicos, biológicos y radiactivos que debe cumplir el agua potable y además, es aplicable a cualquier sistema de abastecimiento agua potable⁶ de la República de Panamá.

Calidad del agua en el lago Gatún

En el último informe de calidad del agua, presentado por la ACP en el año 2015, los registros con calidad *Excelente*, con un promedio de 91, fueron en su mayoría en estaciones de muestreo del lago Gatún, y según se reporta en este

informa, desde que empezó el programa de calidad del agua en el año 2003, este se ha caracterizado por tener las aguas con mayores índices de calidad del agua. Sin embargo, el promedio del ICA, de todas las estaciones de muestreo del lago Gatún es de 88, siendo la calidad del agua calificada como *Buena*. En general, en el lago Gatún, se obtuvo que el 57% de los índices de calidad del agua es buena, un 42% excelente y un 1% media.

Y para el total de la cuenca Hidrográfica del canal de Panamá, se obtuvo que un 2% del agua es Medio, 78% Bueno y el 20% Excelente, que, comparado con los datos de años anteriores, evidencia unacalidad del agua de la cuenca estable, pues no presenta variaciones significativas (figura 4).

⁶ Objeto y campo de aplicación. Reglamento técnico DGNT-COPANIT 23-395-99.

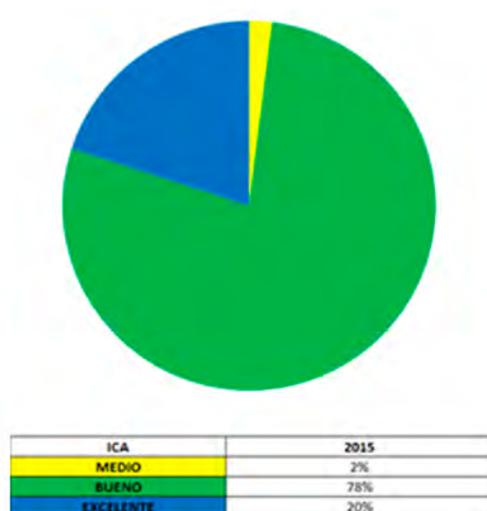


Figura 4. Distribución porcentual ICA, CHCP 2015.

Fuente: Informe de Calidad de agua 2015-ACP.

Sistema de tratamiento de agua potable en el lago Gatún (Panamá)

La planta potabilizadora de Sabanitas, basa el tratamiento del agua en un proceso de filtración directa. Este inicia con la captación directa de la fuente, en este caso el lago Gatún y continúa con su respectiva medición, luego la dosificación del coagulante, mezcla rápida y coagulación, floculación, sedimentación, filtración directa, desinfección y almacenamiento.

- Captación: en el punto de captación del agua, hay una reja o malla que impide el paso o la penetración de elementos como ramas, troncos, rocas, vegetación e incluso peces.
- Medición del caudal: se mide con cierta frecuencia, y con la mayor precisión posible, el caudal de agua cruda que entra al proceso de potabilización, ya que esto permite determinar la dosificación de químicos a utilizar durante la coagulación.
- Dosificación de coagulante: en este punto del proceso se agrega a todo el caudal medido inicialmente, la cantidad exacta de una sustancia química, que puede ser sulfato de aluminio o cloruro férrico, este último utilizado con menos

frecuencia. El coagulante se agrega con el fin de producir desestabilización y aglutinación de los sólidos suspendidos en el agua.

- Mezcla rápida y coagulación: el coagulante agregado anteriormente debe ser mezclado, generando una turbulencia en el flujo del agua para poder lograr el objetivo de este. Esta turbulencia puede ser de tipo hidráulico, mediante un resalto, o mecánica mediante la agitación inducida utilizando un equipo electromecánico. El coagulante comienza a reaccionar con el agua inmediatamente después de ser agregado, lo que produce desestabilización de las partículas en suspensión y forma microfloc (aglomeraciones de las partículas desestabilizadas). En el proceso de coagulación pueden influir varios factores, entre ellos: las características del agua y las sustancias químicas
- Floculación: proceso de agitación suave y continua, que da paso a la formación de los "flocs", estos deben adquirir un tamaño y peso que les permita ser sedimentados, para que el proceso sea exitoso, la velocidad de agitación debe ser decreciente, es decir, un poco más fuerte al comienzo para ir disminuyendo y que al final sea más leve.

- Sedimentación: se sedimentan los sólidos suspendidos en el caudal de agua que está en proceso de potabilización.
- Filtración directa: luego de que el agua pasa por el decantador, esta llega hasta un filtro, donde sigue su recorrido a través de diferentes capas de arena y grava, para que las partículas restantes de adhieran al material.
- Desinfección: para asegurar la potabilización del agua, se agrega cierta cantidad de cloro que elimina el exceso de bacterias y microorganismos presentes en el agua.
- Almacenamiento: el agua tratada se almacena en tanques de almacenamiento para su posterior distribución.

Comparación normativa, parámetros de calidad del agua y tratamiento de potabilización entre Colombia y Panamá.

- Tanto en Colombia como en Panamá, existen normativas que regulan la prestación del servicio de agua potable a las poblaciones, así como los parámetros de calidad del agua para el consumo humano, como se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3. Comparación de normativa, Colombia-Panamá.

Regulación/ País	Normativa	
	Colombia	Panamá
Prestación de servicios de agua potable	Decreto 1575 del 2007	Decreto- Ley No.2 de 1997
Parámetros de calidad de agua para el consumo humano	Resolución 2115 de 2007	Reglamento técnico DGNT-COPANIT 23-395-99

Fuente: elaboración propia.

En Colombia y Panamá, se tienen en cuenta parámetros físicos, químicos, microbiológicos y radiactivos que determinan la calidad del agua para el consumo humano. Aunque en la normativa colombiana no se hace referencia específica a características radiactivas, estas están consideradas dentro de “Las características químicas de

sustancias que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana” (Artículo 5°. Resolución 2115 de 2007) y “Las características químicas de sustancias que tienen implicaciones sobre la salud humana” (Artículo 6°. Resolución 2115 de 2007).

Tabla 4. Comparación de parámetros de calidad del agua para consumo humano, Colombia Panamá

Parámetros de calidad del agua		
Característica/ País	Colombia	Panamá
Físicas	Sí	Sí
Químicas	Sí	Sí
Microbiológicas	Sí	Sí
Radiactivas	Sí	Sí
Índice de Calidad del Agua	I.R.C.A.	I.C.A.

Fuente: propia.

- En desarrollo del presente trabajo, en los tramos de Colombia y Panamá se realizan tratamientos convencionales de potabilización del agua, aunque

en Panamá durante el proceso no se realiza la etapa de aireación del agua y el proceso de sedimentación no se realiza mediante desarenador.

Tabla 5. Comparación del tratamiento de potabilización del agua Colombia-Panamá.

Tratamiento de potabilización del agua		
Proceso/ País	Colombia	Panamá
Captación	Sí	Sí
Medición del caudal	Sí	Sí
Sedimentación	Sí	Sí
Aireación	Sí	No
Coagulación	Sí	Sí
Floculación	Sí	Sí
Filtración directa	Sí	Sí
Desinfección	Sí	Sí
Almacenamiento	Sí	Sí

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

- En Colombia, existen diferentes normativas como la Resolución 2115 de 2007, que establece los parámetros de control y vigilancia de la calidad del agua para el consumo humano. Dentro de estos parámetros, se determinan los niveles de aceptación de las características fisicoquímicas y microbiológicas. De acuerdo con lo establecido en la normativa y a lo que se presenta en el último informe de calidad del agua para el consumo humano, los niveles de aceptación para estas características en la Dorada, y en Puerto Boyacá, están por encima del 80%. A pesar de tener un alto nivel de aceptación, el agua no es apta para el consumo humano (aunque estas dos poblaciones cuentan con planta de tratamiento de agua potable de tipo convencional) pues los niveles de riesgo IRCA son de 14.78% y 10% respectivamente, que a pesar de no ser porcentajes muy altos, representan un nivel de riesgo de enfermedades bajo y medio.
- En Panamá, además de que existe un Decreto-Ley (Decreto-Ley No. 2 del 7 de enero de 1997) que regula la prestación de los servicios de agua potable y alcantarillado, el reglamento técnico DGNT-COPANIT 23-395-99 establece los requisitos físicos, químicos, biológicos y radiactivos que debe cumplir el agua potable en este país y que debe ser aplicable a cualquier sistema de abastecimiento de agua potable. Sumado a esto, la ACP canal desde el año 2003 formó la unidad de calidad del agua, que anualmente presenta un informe de calidad del agua de la cuenca hidrográfica del canal de Panamá, donde se evalúan diferentes parámetros, como microbiológicos, nutrientes, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto y el índice de calidad del agua ICA. En general, en índice de calidad del agua de la cuenca está calificado como Bueno, pero para el caso del lago Gatún, la mayoría de sus puntos de muestreo obtuvieron un puntaje de 91, siendo el agua calificada como Excelente. Esto quiere decir que el agua proveniente de esta no fuente, no representa ningún riesgo para el abastecimiento y consumo de las poblaciones.
- Durante el desarrollo del taller internacional, se pudo evidenciar que Colombia y Panamá, son dos

países con características muy diferentes, entre ellas su tamaño, densidad poblacional, cultura, crecimiento económico, etc. Sin embargo, para el desarrollo específico de este trabajo se vio reflejada la gran similitud que hay en cuanto a los tratamientos de potabilización del agua para el abastecimiento y consumo de las poblaciones, y a los parámetros de calidad del agua. Pues como se mostró a lo largo de este trabajo, ambos países cuentan con normativa vigente que regula y vigila la prestación de servicio de agua potable, las características que debe tener el agua apta para el consumo humano y el tratamiento de potabilización es de tipo convencional, en ambos casos, aunque con unas diferencias poco significativas.

Referencias bibliográficas

- Autor? . *Ciencias de la tierra y del medio ambiente*. Impactos ambientales de la agricultura moderna. Recuperado de: <http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/06Recursos/121ImpactAmbAgr.htm>
- Autoridad del Canal de Panamá. Informe de Calidad del Agua 2015. Recuperado de: <http://micanaldepanama.com/nosotros/cuenca-hidrografica/>
- Colombia, Instituto Nacional de Salud. (2015) *Estado de control y vigilancia de la calidad del agua para consumo humano*. (V Informe). *Calidad del agua para el consumo humano en Boyacá*. Bogotá D.C.
- Colombia, Instituto Nacional de Salud. (2015). *Estado de control y vigilancia de la calidad del agua para consumo humano*. V Informe. Bogotá D.C.
- Consejo de Gabinete. *Decreto-Ley No.2 del 7 de enero de 1997*. República de Panamá.
- Decreto 1575 de 2007. República de Colombia. Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Ministerio de la Protección Social, Bogotá, Colombia, 9 de Mayo de 2007
- El agua potable segura es esencial. Recuperado de: <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Filtration-Systems-technologies.html>

- El lago Gatún. Recuperado de: <http://www.panamatour.net/articulo/el-lago-gat%C3%BAAn>
- Empresa de Servicios Públicos de La Dorada. Recuperado de: <http://www.espladorada.com/>
- Empresas Públicas de Puerto Boyacá. Recuperado de: <http://www.epb.gov.co/>
- Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales IDAAN. Ampliación de la planta potabilizadora Sabanitas. Recuperado de: [http://siproy.mef.gob.pa/tab/22850_2015_25827_AMPLIACION%20PLANTA%20SABANITAS%20\(1\).docx](http://siproy.mef.gob.pa/tab/22850_2015_25827_AMPLIACION%20PLANTA%20SABANITAS%20(1).docx).
- Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales IDAAN. Plantas potabilizadoras de Panamá: recuperado de: <http://mtep.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=11705db724274ad7832863897512a7a3&shareWithWebMap=true>
- La Corporación del Río Grande de la Magdalena. *Atlas de la cuenca del río Magdalena*. Recuperado de: http://wiki.ead.pucv.cl/images/1/1b/Atlas_cuenca_del_rio_magdalena_version_final.pdf
- Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Artículo 5°-Resolución 2115 de 2007. República de Colombia. Recuperado de: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf
- Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Artículo 6°-Resolución 2115 de 2007. República de Colombia. Recuperado de: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf
- Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Artículo 15°-Resolución 2115 de 2007. República de Colombia. Recuperado de: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf
- Objetivos estratégicos del canal de Panamá. Autoridad del Canal de Panamá. Recuperado de: <http://micanaldepanama.com/nosotros/sobre-la-acp/rendicion-de-cuentas/objetivos-estrategicos/>
- Operación y mantenimiento de plantas de potabilización de agua. Recuperado de: http://repositorio.sena.edu.co/sitios/calidad_del_agua/operacion_potabilizacion/index.html#
- Panamá, Ministerio de Comercio e Industrias. (1999). *Dirección general de normas y tecnología industrial*. Reglamento técnico DGNT-COPANIT 23-395-99. 17 de diciembre de 1999. República de Panamá.
- Planta de Tratamiento de Agua Potable -PTAP. Recuperado de: <http://www.aguasistec.com/planta-tratamiento-de-agua-potable.php>
- Resolución 2115 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá, Colombia, 22 de junio de 2007.
- Resolución No. 1096. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. Ministerio de Desarrollo Económico, Bogotá, Colombia, 17 de noviembre del 2000.
- Saniaguas S. A. S. Torres Aireación. Recuperado de: <http://www.saniaguas.com/content/torres-de-aireaci%C3%B3n>
- Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. *Operación y mantenimiento de plantas de potabilización*. Recuperado de: http://bibliovirtual.minambiente.gov.co:3000/DOCS/MEMORIA/MD-0024/MD-0024_CAPITULO%205.pdf

Universidad de Pamplona. Índices de Calidad (ICAs) y de contaminación (ICOs) del agua de importancia mundial (p. 47). Recuperado de: [http://www.](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatetest_capitulo3.pdf)

[unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatetest_capitulo3.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatetest_capitulo3.pdf)

Uso de residuos de minería para agregados de construcción

Efraín Casadiego Quintero

casadiego.quintero@uniagraria.edu.co

Nelson Joman Vargas Ortiz

vargas.nelson@uniagraria.edu.co

Resumen

La minería de oro en Colombia ha sido explotada en un principio por los indígenas de nuestro territorio para hacer sus obras ornamentales, después fue explotada y exportada por la corona española durante la época de la colonización, por lo cual el oro ha formado parte de la cultura colombiana. Colombia debido a las condiciones geológicas y geográficas cuenta con un subsuelo rico en minerales e hidrocarburos por lo cual el sector minero es uno de los principales motores de la economía del país. Los principales yacimientos de auríferos están en Choco, Antioquia, Pacífico, Nariño, Cauca, Tolima y Caldas los cuales se encuentran ubicados muy cerca de las fuentes hídricas en donde van a parar muchas veces los residuos, lo que evidencia una mala manipulación y manejo de los mismos. Dado lo anterior, en el presente documento se plantea la utilización de estos residuos para los agregados de construcción teniendo en cuenta su composición físico-química y mecánica del mismo.

Palabras clave: Minería, Estériles, Gestión de Residuos y Agregados de Construcción.

Abstract

Gold mining in Colombia has been exploited initially by the natives of our territory to make their ornamental work was later exploited and exported by the Spanish crown in the colonization which the gold formed part of the Colombian culture. Colombia due to geological and geographical features a subsoil rich in minerals and hydrocarbons which conditions the mining sector is one of the main drivers of the economy. The main deposits of gold are in Choco, Antioquia, peaceful, Nariño, Cauca, Tolima and Caldas which are located very close to water sources where they will for many times the waste showing poor handling and management thereof, whereby the use of these residues for construction aggregate considering its physico-chemical and mechanical.

Keywords: Mining, Sterile, Waste Management, Construction Aggregate.

Introducción

La minería de oro en Colombia ha sido explotada desde hace más de 500 años desde la época precolombina, en un principio por los indígenas de nuestro territorio para hacer sus figuras y orfebrería (Friede, 1973, Coe, et al., 1989, Gutiérrez, et al., 2002 & Bouchard, et al., 2003). Al principio del siglo XX la explotación minera se acentuó y aumentó el uso de químicos tóxicos como el cianuro y el mercurio, este tipo de explotación trajo como consecuencias enfermedades para las personas que manipulan los químicos y la población que tiene acceso a los ríos donde son vertidos estos químicos (Díaz-Arriaga, 2014). También llama la atención la disposición del material estéril o con muy bajo porcentaje de oro, que no es económicamente explotable. Este residuo de la minería es arrojado en algunos casos a los ríos o dispuestos generando terrazas inestables. En el Grupo de Investigación en Ingeniería Civil y Fenómenos Ambiental (GIICFA) se están desarrollando proyectos desde los semilleros donde se trabaja en procesos innovadores que buscan disminuir o evitar totalmente el uso del mercurio y el cianuro. También se están haciendo estudios para la gestión del manejo de residuos de minería que pueden ser usados como agregados para la ingeniería civil.

En algunos países de Europa ya se prohibió la extracción del oro con cianuro debido a la contaminación que genera y lo difícil que es recuperar los afluentes y tierras, que son dañadas por su uso (Diario Página 12, 2010). Según la información dada por los administradores de las minas en el municipio de Vetas, Santander, es claro que los empleos generados en la minería de oro no son trabajos estables, la mayoría de las veces, ni seguros, años después de que las personas dejan de trabajar en las minas, aparecen las enfermedades derivadas de esa labor.

Desarrollo del tema

La extracción de oro en la mina Elsy en el municipio de Vetas, demuestra que se puede realizar la explotación minera de una manera diferente, sin necesidad de utilizar cianuro o mercurio; además de disminuir el riesgo por enfermedades laborales generadas por la minería también se está cuidando el medio ambiente. Por medio de la extracción del oro con ecominería ha aumentado la eficiencia para extraer el mineral de la roca, esto debido a las mayorías de partículas de oro eran lavadas junto con el cianuro.

Las partículas de oro se encuentran dentro de la roca encajante, un material estéril o con poco porcentaje de oro. El material estéril está conformado por el neis de Bucaramanga, una roca masiva, tenaz, compacta y bandeada con filones cuarzosos con sulfuros (García & Uribe, 2006). Alguno de estos agregados gruesos ricos en sílice, con diámetros mayores a 20 cm se utilizan para estabilizar los taludes de la mina (Figura 1).



Figura 1. Utilización de agregados gruesos como gaviones.



Figura 2. Mezcla de partículas de oro con lodo grisáceo.

Debido a que la resistencia al corte del neis es más alta que la roca que contiene el yacimiento de oro (Figura 2), en el momento que este material es dinamitado dentro de la mina los bloques de neis (roca estéril) tienden a ser

de mayor tamaño, mientras los de yacimiento de oro son fragmentados a una escala menor.

Este resultado se aprovecha para el material por el tamiz formado de barras de acero (Figura 3).



Figura 3. Malla 20x20 cm para el paso del material con mayor porcentaje de oro.

La separación del oro de la roca empieza con el tamizado del material extraído de la mina con una malla de 20x20 cm, el material que pasa la malla es llevado a una trituradora de mandíbula, luego a un molino que pulveriza la roca, posteriormente el material es lavado y captado por medio de unos tapetes especiales, el cual es lavado en una pila y finalmente por medio de la batea el oro es separado de los granos estériles. En este proceso se generan tres tipos de residuos de minería: los bloques de roca que no pasa la malla, el material fino que no es captado por los tapetes y la arena y el lodo que son separadas en una mesa vibratoria inclinada. .

La característica principal de dicho problema a tratar en esta investigación, es el manejo que se le da a los diferentes tipos de residuos sólidos de la minería ya sean los del entorno o el que queda después de la extracción del mineral, que es llamado estéril el cual es muy diferente a los desechos. Los desechos son el beneficio que se obtiene del mineral ya fragmentado del mineral útil, que es separado del mineral ganga a través de procesos físicos, químicos y físico químicos como los son la lixiviación, la flotación, la fundición y el refinado electrolítico, de hecho, uno de los tratamientos más conocidos para el tratamiento de estériles.

Una práctica muy común en gran parte de las minas es la clasificación y manipulación de los residuos. Se separan por la disposición de estériles y otros tipos de residuos en una escombrera, lo que causa una problemática seria en lo que compete a la explotación minera, ya que se suele dejar poca fertilidad en el suelo y poca estabilidad del mismo, sin dejar de lado el impacto ambiental en relación con la fauna y flora y las fuentes hídricas cercanas a la mina, un problema que se presenta tanto en minas legales e ilegales del sector minero.

Esta investigación se realizó con el fin de conocer el tipo de residuos sólidos en las ecominería y el manejo de los mismos, con base en el contexto a nivel económico, cultural, social y ecológico del mismo, lo que permitió

identificar la relación que hay entre el mineral y el estéril. Este proceso se conoce como tenor de corte, que es el que define la parte económicamente explotable, es decir, el mineral. Es de tener en cuenta, el límite entre la mineral útil y la estéril teniendo con el factor geoeconómico: el materia estéril que no es útil en ese momento puede llegar a serlo en un futuro.

En la figura 4 se observa la metodología utilizada para el estudio de la gestión del manejo de los residuos, para la cual fue necesaria la toma de muestras de cada una de las fases de separación del sedimento. , Así las cosas, fue necesario consultar el manejo y manipulación de residuos sólidos en minería, los métodos y tratamientos empleados en cada caso, bajo un contexto nacional e internacional.



Figura 4. Flujograma de trabajo.

Fuente: ¿?

A los bloques que no pasaron la malla 20x20 cm se les hizo prueba de compactación, elasticidad y se les analizó el coeficiente de corte y la mineralogía. Con este análisis se concluyó que el material es apto para usar como agregado en rellenos. Al material arenoso y fino se le hizo análisis mineralógico para conocer la redondez y composición de los granos. Estos análisis que tienen buena consistencia y se

podría utilizar como arena para construcción, mientras al mineral arcilloso podría ser utilizado para el uso ornamental.

Discusión

El estudio del material estéril de la mina Elsy dio información que se utilizó para proponer la reutilización

adecuada, pero hay que tener en cuenta que debido a que el material estaba libre de contaminantes como cianuro y mercurio, permitió que el material fino fuera fácilmente estudiado y que se le propusiera un uso adecuado. En el caso que el material hubiera estado contaminado, la reutilización sería más dispendiosa y costosa, debido a que habría necesidad de descontaminarla.

Para el caso de la separación de residuos minerales es importante un diseño hidráulico eficiente que permita disminuir la contaminación de las fuentes hídricas por los sedimentos que son vertidos a las quebradas o ríos. Definiendo el uso que se le va a dar a este residuo estéril, se puede mejorar ese sistema hidráulico.

Conclusiones

Este método de extracción necesita ser mostrado y enseñado a las mineras pequeñas y artesanales, como un método alternativo, de extracción, seguro y eficiente.

La minería de oro está estigmatizada en Colombia debido a la minería ilegal y al miedo de las pequeñas mineras de cambiar sus métodos. Sería bueno que el Estado incentivara estas buenas prácticas y las diera a conocer.

La ecominería hasta ahora se encuentra en una fase de inicio en Colombia, hay muchas investigaciones que realizar, las universidades y centros de investigación deben empezar a contribuir al desarrollo de las regiones por la producción, medio ambiente y mejoras del servicio.

Referencias

Aranda, D. (2010). Rechazo en Europa a la minería con cianuro. *Diario Página 12*, Argentina.

Bouchard, J. F. & Usselmann, P. (2008). Trois millénaires de civilisation entre Colombie et Equateur: La région de Tumaco la Tolita. *CNRS Editions*. París.

Brasil, Unesco. (1995). *Aspectos Geológicos de Protección Ambiental*. Volumen I. Sao Paulo: Sánchez, L.E.

Bugin, A., Costa, J. F. (1989). Recuperacao de áreas con mineracao de carvao. *Brasil Mineral*. Pp. 71-54-60

Coe, S., & Benson. (1989). *América Antigua. Civilizaciones precolombinas*. Barcelona: Círculo de Lectores.

Díaz-Arriaga, F. (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista Salud Pública*, pp. 947-957.

Friede, J. (1963). *Los Quimbaya bajo la dominación española*. Segunda edición, Bogotá D.C.: Carlos Valencia Editores, p.13.

García Ramírez, C.A & Uribe Portilla, E. (2006). Caracterización Geológica y Mineralógica del Yacimiento la Tosca (Vetas, Santander, Colombia): Implicaciones para el Procesamiento Mineral de las Menas Auroargentíferas. *Boletín de Geología* Vol. 28, No. 2.

Robinsky, E. I. (1975). Thickened discharge, a new approach to tailing disposal. *CIM Bulletin*, 68, Pp. 47-53

Sistema de insonorización en materiales renovables para viviendas en Bogotá

Ramiro de Jesus Gloria Lambraño

Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil
rdgloria15@ucatolica.edu.co

Resumen:

xxxxxxx

Abstract

En el presente trabajo de investigación se reconoce la problemática de ruido en la ciudad de Bogotá, se dan a conocer las mayores implicaciones de esta y se demuestra que las medidas tomadas no han sido suficientes para mitigar dicha problemática. Se especifican las mayores fuentes de ruido y la población más vulnerable ante el ruido urbano. Posteriormente se realiza una investigación que enfatiza las distintas metodologías y teoría acerca del aislamiento acústico, para definir un sistema de insonorización adecuado con el uso de materiales no convencionales que responden a las necesidades de la población estudiada, dando Como resultado se presentan distintos sistemas de insonorización, que cuentan en su mayor parte con materiales sostenibles y pueden ser integrados a las viviendas, según los requerimientos generales de cada una, además, brindan un correcto aislamiento acústico y por lo tanto una mejor calidad de vida a los habitantes.

Palabras clave: Ruido, Contaminación, Aislamiento, Absorción, Sonido, Ondas, Trastorno, Salud, Audición, Acústica, Reverberación, Ambiente, Normas, Manuales, Materiales, Calidad, Diseño, Producción, Sostenibilidad, Renovable.

Introducción

El ruido en zonas urbanas ha venido presentando una problemática que se incrementa a través de los años. Se ha convertido en un importante factor de contaminación ambiental que afecta directamente a los habitantes de viviendas en las principales urbes alrededor del mundo, las personas afectadas presentan afectaciones directas a su salud, tanto física como mentalmente lo que altera la calidad de vida de las mismas.

Organizaciones y entidades tanto internacionales como nacionales, regionales, locales y privadas se han dedicado a identificar las principales problemáticas de ruido, divulgan información sobre los niveles de ruido perjudiciales, las fuentes de ruido que afectan directa o indirectamente a las personas y hacen guías o reglamentos, los cuales permiten incidir en la regulación del ruido urbano enfocados principalmente en la emisión y propagación del mismo. [1], [2]

En la ciudad de Bogotá, Colombia la problemática de ruido ha sido regulada mediante leyes nacionales adaptadas a la ciudad para mitigar el ruido urbano; sin embargo, tanto en Bogotá como en la mayoría de ciudades se ha reconocido que, aunque hay normativas que regulan y sancionan la emisión y propagación de ruido son difíciles de aplicar y en algunos casos no hay manera de hacer una regulación eficiente, debido a la incapacidad de las autoridades para hacer una medición y control de ruido constante, principalmente en zonas residenciales [3]

En algunos casos, las fuentes de ruido no pueden ser mitigadas. Su principal fuente es la de tráfico:vehicular, aéreo y ferroviario. [1]

Debido a la incapacidad de mitigar el ruido en ciertos lugares, se han implementado sistemas de aislamiento acústico que evitan tanto la entrada como salida de ondas de sonido, entre estructuras permitiendo que el ruido pueda ser disipado. Los sistemas de insonorización, han sido aplicados principalmente en áreas comerciales, industriales o de uso privado como auditorios, empresas, algunas instituciones educativas, centros comerciales, centros recreativos y salones de eventos, entre otros. Sin embargo, la utilización de sistemas de insonorización en vivienda ha sido ignorada debido a su poca utilización en viviendas alrededor del mundo, así como el aumento de costos de construcción de vivienda.

Por otro lado, los sistemas de insonorización comunes también tienen un problema debido a que los productos más eficientes han mostrado ser dañinos para el medio ambiente. Los materiales más utilizados han sido el plomo y actualmente las espumas plásticas.

Dada la importancia de la problemática ambiental alrededor del mundo, se ha buscado mitigar cualquier tipo

de contaminación ambiental para mejorar la calidad de vida de los seres humanos y de las distintas especies que habitan en el planeta tierra.

En el presente proyecto se busca mitigar los distintos problemas ambientales tanto de contaminación por ruido como por materiales de aislamiento acústico en la ciudad de Bogotá, Colombia. Se analizan los distintos sistemas de insonorización utilizados alrededor del mundo, así como los materiales aplicables para dichos sistemas, de este modo se propone un diseño eficiente que reduce el ruido en viviendas y que a su vez, es sostenible, lo que trae como resultado un mejoramiento en la calidad de vida de la población afectada y un mejor impacto ambiental en la construcción de vivienda urbana.

Diseño metodológico

A. Diagnóstico.

1) Generalidades de Emisión de Ruido

El ruido es un fenómeno acústico intrínseco en la naturaleza que se da por el contacto entre superficies, así como por reacciones químicas que producen sonido; sin embargo, el ruido contiene cualidades peculiares que varían

según el ambiente en el que se genere, la fuente emisora del sonido, el sujeto receptor de dicho sonido y de por sí, el enfoque que se le da al ruido. [4] Según estimaciones

internacionales, [1] el ruido en ambientes urbanos es generado por las fuentes descritas en el cuadro 1.

Tabla 1. Porcentaje de ruido producido por las fuentes específicas en Bogotá.

Fuente General	Fuentes específicas	Porcentaje de ruido producido
Trafico		80%
	Vehiculos	68%
	Tráfico Aéreo	10%
	Ferrocarriles	2%
Industria		10%
	Actividades Industriales	2,6%
	Comercio	7,4%
Construcción y servicios		6%
	Construcción y Excavación	3%
	Servicios generales	3%
Actividades domésticas y ocio		4%

Fuente: elaboración propia.

En Colombia el tema de ruido aún es algo nuevo a tratar, aunque se ha avanzado en distintos estudios y reglamentaciones, estas se han dado de manera empírica. En algunos casos se ha hecho con conocimientos básicos de acústica o basados en normas y recomendaciones internacionales, entre las cuales se encuentra la más importante que es la emitida por la Organización Mundial de la Salud (ver Tabla 2).

Sin embargo, en Colombia las penalizaciones por contaminación auditiva no son tan rigurosas ni se encuentran controladas de ninguna manera, por lo tanto, para el debido control se realizan chequeos eventuales en las zonas más vulnerables y en algunos casos debido a reportes ciudadanos que soliciten el control por contaminación por ruido en ciertos sectores.

Tabla 2. Niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud

Límite	Efecto a evitar o situación en la que se aplica
100 - 130 dBA	Incomodidad auditiva
130 - 140 dBA	Riesgo de daño físico (por ejemplo, perforación del tímpano)
130 dBA	Dolor agudo
70 dBA L_{eq24}	Daño auditivo despreciable
30 dBA L_{eq}	Excelente inteligibilidad
45 dBA L_{eq}	Inteligibilidad completa
40 - 55 dBA L_{eq}	Inteligibilidad razonablemente buena
$T_{rev} < 0.6$ s	Adecuada inteligibilidad
$T_{rev} = 0.25 - 0.5$ s	Inteligibilidad adecuada para los hipoacúsicos
$S/N > 0$ dB	Comprensión de la palabra
$S/N > 10$ dB - 15 dB	Comprensión de la palabra extranjera, escuela, teléfono, mensajes complejos
100 dBA L_{eq4}	Conciertos
90 dBA L_{eq4}	Discotecas

140 dB peak	Sonidos Impulsivos
ASPL < 80 dBA	Juguetes, en el oído del niño
CSPL < 130 dBC	Juguetes, en el oído del niño
30 dBA L_{eq}	Ruido interior
40 - 45 dBA L_{max} (fast)	Eventos ruidosos aislados al dormir
45 dBA L_{eq}	Ruido externo al dormir (ventana reducción de 15 dB)
35 dBA L_{eq}	Salas de hospital
45 dBA L_{max} (fast)	Eventos ruidosos aislados, salas de
50 - 55 dBA L_{eq}	Exteriores de día
40 - 50 dBA L_{eq}	Exteriores de noche
$T_{rev} = 1 s$	Buffet de escuela
55 dBA L_{eq}	Patios de escuela

Fuente: Berglund, B.; Lindvall, T. (1995) (ed.). Community noise. Stockholm: Center for Sensory Research, Stockholm University and Karolinska Institute.

La normativa de emisión de ruido en Colombia se encuentra regulada por la Resolución 0627/06 y dispone con ciertas resoluciones que permiten modificar u obtener permisos de emisión de ruido:

Resolución DAMA No. 185/99: establece condiciones generales para la obtención de permisos de perifoneo en el Distrito Capital.

Resolución DAMA No. 832/00: establece la clasificación empresarial por impacto sonoro UCR que permite valorar las industrias y establecimientos, respecto a su nivel de generación de ruido.

En la ciudad de Bogotá el control de emisión de ruido se hace mediante las entidades ambientales y se imponen sanciones según la Ley 1801 de 2016 descritas en los

siguientes artículos: Artículo 33°: Comportamientos que afectan la tranquilidad y relaciones respetuosas de las personas.

Artículo 84°: Perímetro de impacto de la actividad económica.

Artículo 93°: Comportamientos relacionados con la seguridad y tranquilidad que afectan la actividad económica.

Con respecto a los máximos estándares de emisión de ruido mostrados en el cuadro 3 se hace una regulación el máximo ruido ambiental que se puede encontrar en distintos sectores según el uso del suelo en los mismos.

Tabla 3. Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido expresados en decibeles.

Sector	Subsector	Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido en dB(A)	
		Día	Noche
Sector A. Tranquilidad y Silencio	Hospitales, bibliotecas, guarderías, sanatorios, hogares geriátricos.	55	50
Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado	Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes.	65	55
	Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación.		
	Parques en zonas urbanas diferentes a los parques mecánicos al aire libre.		
Sector C. Ruido Intermedio Restringido	Zonas con usos permitidos industriales, como industrias en general, zonas portuarias, parques industriales, zonas francas.	75	75
	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos.	70	60
	Zonas con usos permitidos de oficinas.	65	55

	Zonas con usos institucionales.		
	Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre.	80	75
Sector D.	Residencial suburbana.	55	50
Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado	Rural habitada destinada a explotación agropecuaria.		
	Zonas de Recreación y descanso, como parques naturales y reservas naturales.		

Fuente: Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 0627 (07, abril, 2006), donde se adopta la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental. Modificado por la Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá D.C.

Emisión de ruido en la ciudad de Bogotá:

En el estudio realizado [5] se hizo la medición de zonas en las cuales se producían los mayores índices de ruido ambiental. Como punto base se tomó la resolución 0627 de 2006 para delimitar sectores y posteriormente seleccionar microambientes de acuerdo con la mayor y menor contaminación auditiva.

En la ciudad de Bogotá comparativamente a la resolución 0627 de 2006 se encuentra niveles de ruido excesivos los cuales afectan de manera perjudicial la salud de las personas. La zona más afectada por el ruido es la de Kennedy, que fluctúa entre los 75dB(A) y los 95dB(A). Le sigue Fontibón y Antonio Nariño con niveles de ruido similares a los de Kennedy. En la localidad de Chapinero ronda los 87dB(A) y Engativá entre los 65dB(A) y los 85 dB(A).

Los resultados obtenidos del estudio realizado y resumidos en la tabla 4 permiten demostrar que en el 75%

de los casos evaluados, no se cumple con lo especificado en la norma: “Para la comparación con la norma nacional se debe destacar que ésta se utilizó simplemente como un valor de referencia, dado que los períodos de integración establecidos en la Resolución 627 de 2006 son distintos (14 horas) a los utilizados en este estudio (8 horas). Estos últimos son típicos para investigaciones”. [5]

El mayor índice de incumplimiento se daba en el sector A (hospitales) el cual es el que requiere mayor tranquilidad debido a la sensibilidad del mismo; en el sector residencial se encontró que los intervalos analizados no cumplen para ninguna de las situaciones esperadas. En el día se podían encontrar niveles de ruido perjudiciales para la salud tanto en efectos auditivos como no auditivos y en los intervalos nocturnos, se observó que llegan a niveles que afectan directamente el sueño (los efectos de los niveles mostrados se mostraran en el capítulo siguiente) por lo tanto, el sector residencial se encuentra altamente vulnerable ante las implicaciones del ruido en las persona.

Tabla 4.: Resultados de presión sonora en mediciones de ruido ambiental.

Sector	Subsector	Microambiente	Norma dB(A)	$L_{A,eq,8h}$ dB(A)	$L_{max,8h}$ dB(A)	$L_{min,8h}$ dB(A)	L_{pico} dB(A)	L_{90} dB(A)
A	Hospital	Escenario con menor contaminación	55	60	79	52	114	55
		Escenario con mayor contaminación		73	94	60	113	66
B	Residencial	Escenario con menor contaminación	65	60	88	46	105	50
		Escenario con mayor contaminación		69	81	56	107	61
C	Comercial	Escenario con menor contaminación	70	65	83	51	111	58
		Escenario con mayor contaminación		76	92	67	115	71
D	Parque	Escenario con menor contaminación	55	56	78	46	105	48
		Escenario con mayor contaminación		61	82	54	106	57

Fuente: Pacheco, Franco y Behrentz (2009)

En un convenio con la Universidad Inca publicado por la Secretaría Distrital de Ambiente [6], se realizó una medición de ruido ambiental producido por los distintos tipos de fuentes, lo que trajo como resultado los mapas de ruido de la ciudad tanto de día figura 1, como de noche

figura 2, los cuales hacen notar de manera más específica los sectores más afectados por ruido en la ciudad, dando como evidencia que en general la ciudad se encuentra bajo una problemática de ruido grave.

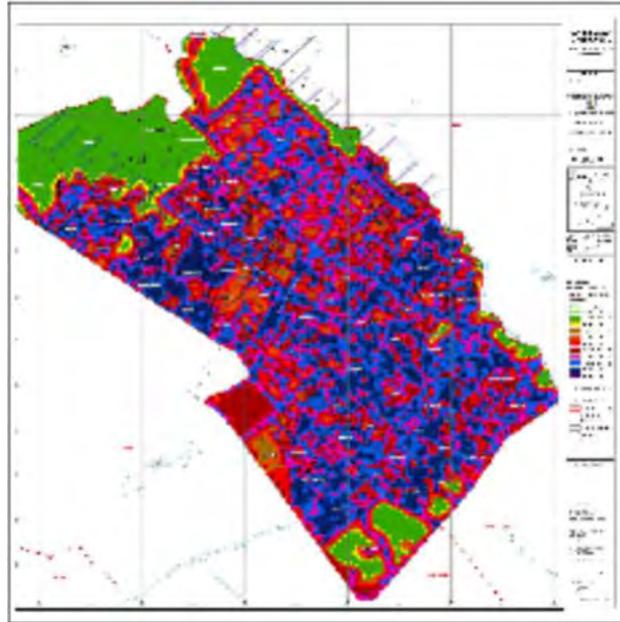


Figura 1. Mapa de ruido diurno en la ciudad de Bogotá.

Fuente: Amaya, M. y Angel, C.. (2008) Como se muestra en los mapas de ruido, los colores azul y rojo corresponden a niveles de ruido superiores a 55 dB(A) siendo azul y púrpura las situaciones más graves. Se puede evidenciar cómo las áreas residenciales son las más propensas a altos niveles de ruido por tráfico, de hecho, se logra ver cómo se forman algunas líneas marcadas por áreas azules en las vías principales de la ciudad, siendo entre las más resaltables y mejor conformadas, la avenida calle 72, la avenida calle 80, la avenida ciudad de Cali, avenida Boyacá y la avenida NQS, avenida calle 26, entre otras.

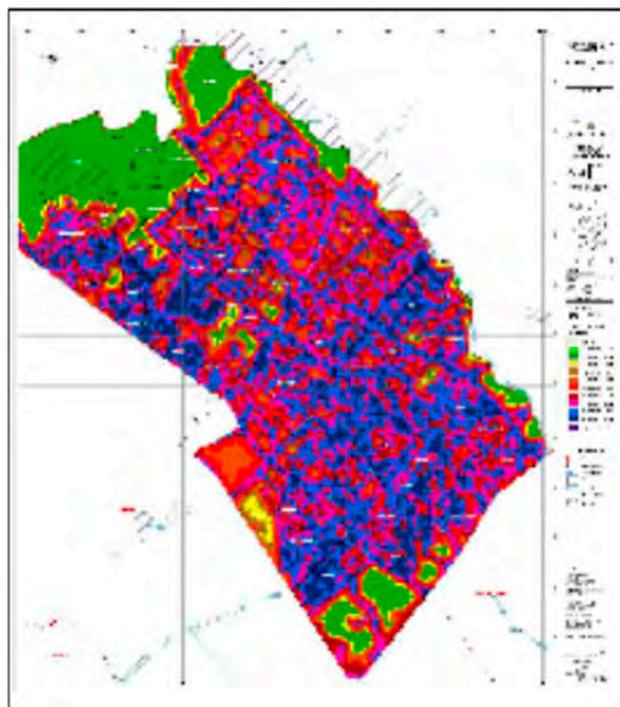


Figura 2: Mapa de ruido nocturno en la ciudad de Bogotá.

Fuente: Amaya M. y Angel, C.. (2008)

Implicaciones del ruido en las personas:

En los últimos años la contaminación acústica se ha convertido en uno de los mayores problemas de salud pública debido a la afectación que el ruido produce en las personas; la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en el 2015, aproximadamente cada día 130 millones de personas, alrededor del mundo se encuentran expuestas a niveles de ruido que superan los 65 dB y la mayoría de estas se encuentran ante niveles de contaminación acústica, que superan los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). [7]

Alteraciones auditivas causadas por el ruido. Las alteraciones que se dan en la audición, se generan cuando las personas tienen afectaciones negativas en su vida normal y esta no se encuentra en sus parámetros normales, los cuales son definidos como la capacidad de detectar sonidos en la gama de 20 a 20 000 Hz. Aunque la audición normal varía entre personas, se ha establecido que durante la edad se va generando pérdida de audición, lo cual es definido como presbiacusia.

La pérdida de la audición es por si el efecto más conocido y se genera por dos factores: intensidad y duración del ruido.

Alteraciones no auditivas causadas por el ruido.

A las alteraciones auditivas explicadas previamente, se anexan otras alteraciones que se producen por encontrarse sometidos a dosis altas de ruido durante lapsos de tiempo mayores. Estas dosis de ruido afectan directamente la salud de las personas expuestas siendo las señales acústicas las que afectan directamente el sistema hormonal de las personas.

En la publicación Ruido y Salud [7] se realiza una síntesis de los mayores estudios aplicados a la situación de alteraciones en la salud causados por el ruido donde se

concluye que la exposición al ruido de tráfico superior a 65 dBA en personas con problemas cardiovasculares, aumenta el riesgo relativo de la enfermedad isquémica del corazón; así como una exposición al ruido de tráfico de 50 dBA aumenta la probabilidad de sufrir de infarto del miocardio y en jóvenes expuestos a ruido ambiental superior a 55 dBA presentan aumentos directos en la presión sanguínea.

Los resultados de estudios realizados en la ciudad de Madrid, España, muestran que las afectaciones más comunes a causa del ruido son las siguientes [8]:

- Relación entre los niveles de ruido de tráfico y los ingresos hospitalarios por urgencias.
- Relación del ruido de tráfico y muerte por causas circulatorias.
- Relación entre el ruido de tráfico y la mortalidad por causas respiratorias.
- Relación entre el ruido de tráfico y la mortalidad por diabetes.

Como resultado se obtuvo el índice de mortalidad atribuible al ruido explicado, comparado con el índice de mortalidad causado por contaminación por PM_{2,5} explicado en la tabla 1.

Algunos experimentos realizados sobre sujetos sometidos a diferentes condiciones de ruido durante el sueño, muestran importantes cambios en los patrones normales de este. En líneas generales, a partir de 45 dBA de ruido, se produce un aumento en la latencia del sueño (tiempo que tarda en iniciarse el sueño normal). El tiempo dedicado a las fases más profundas disminuye, lo que implica que al ser estas fases profundas las necesarias para un sueño reparador, el sujeto suele levantarse con sensación de cansancio; el tiempo de sueño REM disminuye y, lo más preocupante, se ha comprobado un aumento de la tasa de afectación cardíaca durante el sueño.

Tabla 5. Estimación del impacto del ruido sobre la mortalidad en Madrid, según diferentes causas en el grupo de mayores de 65 años. Los impactos se refieren a variaciones de 0,5 db(a) para el caso del ruido y de 10 mg/m3 para el de pm2,5

Indicador de Mortalidad	Leq día (8-22h) RR (95% IC)	PM2,5 RR (95% IC)
Causas naturales (ICD9:1-799)	1,017 (1,005 1,030)	1,017 (1,004 1,030)
Número de muertes atribuibles	312 (92-543)	312 (74-543)
Causas cardiovasculares (ICD9:390-459)	1,024 (1,003 1,046)	1,019 (0,997 1,030)
Número de muertes atribuibles	145 (18-273)	116 (19-244)
Causas respiratorias (ICD9:460-519)	1,031 (1,001 1,062)	1,033 (1,003 1,064)
Número de muertes atribuibles	97 (3-189)	103 (10-195)

Fuente: Tobías A, Recio A, Díaz J et ál. Health impact assessment of traffic noise in Madrid (Spain). Environ. Res. 2015; 137:136-40.

Alteraciones en el sueño

Como se ha demostrado el sueño ininterrumpido, es un prerrequisito para un funcionamiento fisiológico y mental estable en las personas. El ruido ambiental es una de las principales causas por las cuales se realiza la interrupción del sueño, lo que genera distintos tipos de efectos que se pueden separar entre efectos primarios y efectos secundarios que afectan a la persona [1]:

Efectos primarios del ruido sobre el sueño son

- Alteración en la respiración
- Incremento de la presión arterial
- Vasoconstricción
- Cambios en los procesos en el sistema nervioso, generando secreción de hormonas

- Alteraciones psicológicas (depresión, ansiedad, abuso de sustancias)

Efectos secundarios de la alteración del sueño por ruido (el día posterior a falta de sueño por ruido):

- Fatiga
- Estado de ánimo depresivo
- Reducción del rendimiento
- Disminución en el estado de alerta (generando accidentes que pueden causar heridas y hasta la muerte)
- Irritabilidad

Generalidades de la insonorización

El sector constructivo en las zonas urbanas actualmente tiene un problema grave debido a la densificación y aumento

del parte automotor ya que además de tener menores espacios para la construcción, dichas zonas cada vez se encuentran más cercanas a vías principales o de alto tráfico y como se mostró previamente, es una de las mayores fuentes de ruido. El nivel de exigencia del consumidor, relacionado con la vivienda que adquiere es cada vez mayor; además de buscar una mejor calidad de vida con el mejoramiento del hábitat inciden otros factores como puede ser la ubicación, la comodidad, seguridad y tranquilidad. Este último factor se relaciona con el aislamiento acústico. [9]

Para determinar las cualidades acústicas de un elemento constructivo se realiza un análisis en laboratorio, el cual suele concluir que se requiere un aislamiento acústico normalizado (R_n). El resultado de este se da en un valor global de dBA al utilizar la siguiente ecuación $R_n = L_1 - L_2 + 10 \log T_{0}$

Tomando $T_0 = 0,5$ s, el cual es el tiempo de reverberación en una sala promedio en una vivienda

Para el cálculo del índice de aislamiento acústico específico (R) es requerido, según ISO 140, ó la Normativa Básica de la Edificación de España, que la regulación de las condiciones acústicas en edificaciones en NBE CA-88 $R = L_1 - L_2 + 10 \log S_A$.

Siendo el valor R el valor a tener en cuenta para definir la medida de aislamiento acústico entre salas, por lo tanto, mientras R sea menor el aislamiento acústico de material o sistema es mejor.

Aislamiento Acústico

Es el método mediante el cual se utilizan todas las medidas aplicables para controlar o reducir los niveles de ruido en un recinto; donde las medidas están conformadas por dos partes que pueden funcionar como un solo elemento o trabajar independientemente según el aislamiento acústico buscado.

Como se muestra en la Figura 3 una estructura aislante está conformada por un medio absorbente y/o un medio reflectante.

La relación entre el coeficiente de absorción α y el coeficiente de reflexión R es: $\alpha = 1 - R$

Lo cual procede de la ley de conservación de energía acústica (teóricamente verdadera para una superficie no absorbente)

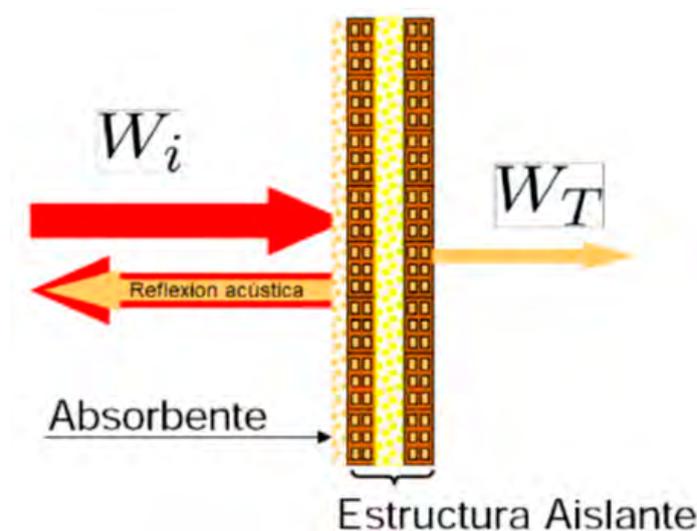


Figura 3.: Ondas sonoras en estructura aislantes

Fuente: Sobreira, M. A. (2006)

Absorción acústica.

Cuando en una habitación o recinto se generan ondas de sonido, y estas llegan a las paredes tienden a realizar dos procesos distintos con estas ondas el primero es el de reflexión en el cual las ondas chocan con el material del muro y son reflejadas, el segundo, la absorción acústica se genera cuando el muro absorbe cierto porcentaje de sonido. [10] La absorción dependerá del tipo de material y el recubrimiento de las superficies. Habíamos visto que la emisión del sonido lleva consigo energía, lo cual lleva a definir el coeficiente de absorción sonora α (alfa) como el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente o reflejada de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{W_{abs}}{W_{inc}}$$

El coeficiente α varía según ciertos factores:

- Angulo de incidencia
- Naturaleza de la fijación del material absorbente
- Naturaleza del cerramiento
- Distancia que separa el material absorbente del cerramiento

Generalmente los materiales más duros y con alta densidad son poco absorbentes como el acero, el caucho o el plomo dando como resultado un valor α cercano a 0, mientras que la absorción se genera en materiales más blandos y con mayor porosidad, en los cuales se encuentran burbujas de aire que inducen a una absorción del sonido y convierten esta en energía térmica obteniendo valores de α cercanos a 1.

Cuando se busca realizar un acondicionamiento acústico, el tratamiento para el acondicionamiento acústico suele efectuarse con elementos materiales destinados a cumplir únicamente con ese requerimiento, que se tornan más específicos cuando se trata de desarrollos arquitectónicos particulares tales como salas de grabación, radiodifusión, teatros, etc. Podríamos distinguir entre materiales acústicos absorbentes y sistemas acústicos absorbentes. En el primero de los casos, son los materiales en sí mismos quienes tienen la propiedad de realizar la absorción del sonido, mientras que los sistemas ya no dependen tanto del material o los materiales utilizados, sino

de las estrategias y montajes realizados para cumplir con el control acústico de los recintos.

Reflexión acústica.

Como se explicó antes, la reflexión acústica se genera cuando una onda de sonido choca con cierta superficie y esta hace que las ondas reboten dentro de la misma área en donde se genera la fuente de sonido, lo que causa a la vez, el sonido directo de la fuente tanto como las reflexiones.

Cabe resaltar, que dentro de la reflexión acústica se encuentran dos tipos de reflexión: temprana y reverberación.

Sistemas de Insonorización

Sistemas absorbentes.

Paneles vibrantes.

Es una estrategia mediante la cual se exponen superficies en movimiento para absorber las ondas sonoras. Cuando la energía sonora incide sobre la superficie, esta quedará sometida a una vibración y en ciertos casos se generará movimiento, tanto la vibración como el movimiento dependerán del material en el que incide la energía sonora, siendo los factores más importantes la rigidez y el peso, la superficie o placa sufrirá una propagación de movimientos vibratorios (movimiento en el sentido de la vibración). En el sistema de paneles vibrantes se estima que mientras mayor sea el movimiento de los mismos, más se genera disipación de energía sonora y por lo tanto, mayor aislamiento acústico. [10]

Resonadores absorbentes.

El resonador es un dispositivo que consiste en una cavidad que comunica al exterior por un conducto en el cual inciden las ondas sonoras. El dimensionamiento de los resonadores depende de la frecuencia que incide en los mismos, por lo tanto, su utilización se encuentra limitada a las mismas. Los resonadores constan de dos compartimientos: una cavidad con un determinado volumen de aire y un cuello de sección y longitud menores a la cavidad. Al incidir la presión sonora, el aire en el cuello se pone en movimiento longitudinal, lo que se asimila a un pistón dentro de un cilindro, pues el volumen de aire contenido en la cavidad actúa como un resorte amortiguador. El sistema cumple

con su función absorbente cuando al movimiento de la masa de aire contenida se le oponen fricciones en el cuello del resonador, generando un gasto de la energía sonora transformándola en energía térmica. [10]

Sistemas aislantes.

Aislamiento por tabiques simples.

Está dado por una pared simple o de una sola capa, la superficie del tabique en cuestión debe estar conformado por una única sección; sin embargo esta no necesariamente debe ser homogénea al igual que puede constar varias capas unidas. Para el aislamiento por tabiques simples se manejan dos factores importantes: el primero, controlable por el constructor la densidad del material utilizado. La capa exterior es la encargada del aislamiento acústico, por lo tanto, el material es calculado según su masa superficial, dado por su peso por unidad de superficie, normalmente expresado en (kg/m^2).

Un material típico en el cual se cuenta con una masa superficial de aproximadamente $400 \text{ kg}/\text{m}^2$, según la frecuencia de octavas, se puede dar aislamiento de entre 6 dBA y 45 dBA

El segundo factor a tener en cuenta es el de las ondas de sonido, ya que tanto la frecuencia incidente como el ángulo de incidencia disminuyen la capacidad aislante del material, donde se puede llegar a dar un efecto de coincidencia en el cual la frecuencia de onda coincide con la frecuencia de vibración del panel. [10]

Aislamiento por tabiques dobles.

Está determinado por trabajar en un sistema de masa-resorte-masa en el cual se encuentran dos tabiques exteriores, que deben contar con espesores y densidades diferentes para evitar el efecto unísono, en el cual, dos paneles iguales tenderían a manejar los mismos comportamientos ante las mismas frecuencias, perdiendo así, el efecto aislante buscado; se podría dar el efecto de coincidencia previamente nombrado.

Entre los dos paneles se encuentra una cavidad llena de aire en el cual el aire funciona como resorte, donde las ondas

sonoras sufren un desgaste energético transformando las mismas en energía calórica. [10]

Aislamiento mediante sistemas compuestos.

Cuenta con un sistema similar al de aislamiento por tabiques dobles, en donde se mejora la cavidad que hace un cerramiento vertical con un material absorbente. Como se explicó, este se encargará de hacer la función de la cámara de aire, para mejorar la función de esta, dadas las propiedades absorbentes de dicho material. La porosidad de este material genera un mayor desgaste energético que se convierte en energía térmica.

Para evitar los puentes acústicos previamente nombrados, así como mejorar el aislamiento acústico, se implementan mejoras al sistema en cuestión utilizando las siguientes variaciones:

- Utilización de caras dobles con estructura independiente, donde se colocan dos estructuras separadas. En cada tabique se utiliza doble capa con variación de material unidos a un material aislante y las estructuras separadas mediante una cámara de aire o un material aislante
- Utilización de doble cara en tabique con material aislante y cavidad de aire interna, lo que permite una mejor vibración de los tabiques y genera cámaras de aire entre los mismos y el material aislante.

Materiales

Se pueden clasificar los materiales aislantes según su estructura dividida entre materiales fibrosos y materiales con estructura celular. Como se muestra en la tabla 3, los materiales también dependen de su origen y cuentan con características propias de aislamiento acústico.

Según el origen de los materiales y la composición de los mismos, estos pueden ser considerados como materiales renovables, sostenibles o contaminantes. Los materiales contaminantes, que no pueden ser reciclados ni reutilizados, producen un alto impacto ambiental durante su fabricación, utilización y desecho. Estos materiales contaminantes son principalmente de origen petroquímico, polímeros y algunos minerales según su composición. [11]

Tabla 6. Clasificación de materiales aislantes

Material	Estructura	Origen	Propiedades acústicas	Densidad superficial aproximada (Kg/m ³)	α^*
Lana de Vidrio	Fibroso	Mineral	Absorbente	40 - 80	0,54 - 1,07
Lana roca	Fibroso	Mineral	Absorbente	145	0,2 - 0,9
Fibra de anuanto ^c	Fibroso	Mineral	Absorbente	---	---
Fibra de madera	Fibroso	Vegetal	Absorbente	250 - 1000	0,3 - 0,63
Fibra de lino	Fibroso	Vegetal	Absorbente	250 - 700	0,4 - 0,63 **

Fuente: elaboración propia

* Los valores varían según la frecuencia, espesores y procesos de fabricación

** Valores aproximados según la composición, densidad o relación con otros materiales de origen o densidades similares (estos valores no son reales por lo tanto deben ser verificados en laboratorio).

^c Materiales altamente contaminantes prohibidos por distintas autoridades ambientales

V es un valor despreciable debido a su cercanía a 0 se considera = 0

Diseño de sistema de insonorización aplicable

Los distintos sistemas de insonorización planteados se ven integrados a los requerimientos generales de las viviendas en Bogotá, lo que atiende tanto las zonas críticas afectadas por el ruido, como cualquier área que se pueda ver

afectada por este. Estos sistemas serán aplicados según los requerimientos de muro o zona a aislar.

Se debe aplicar el esquema mostrado en la figura 1 para el diseño del mismo

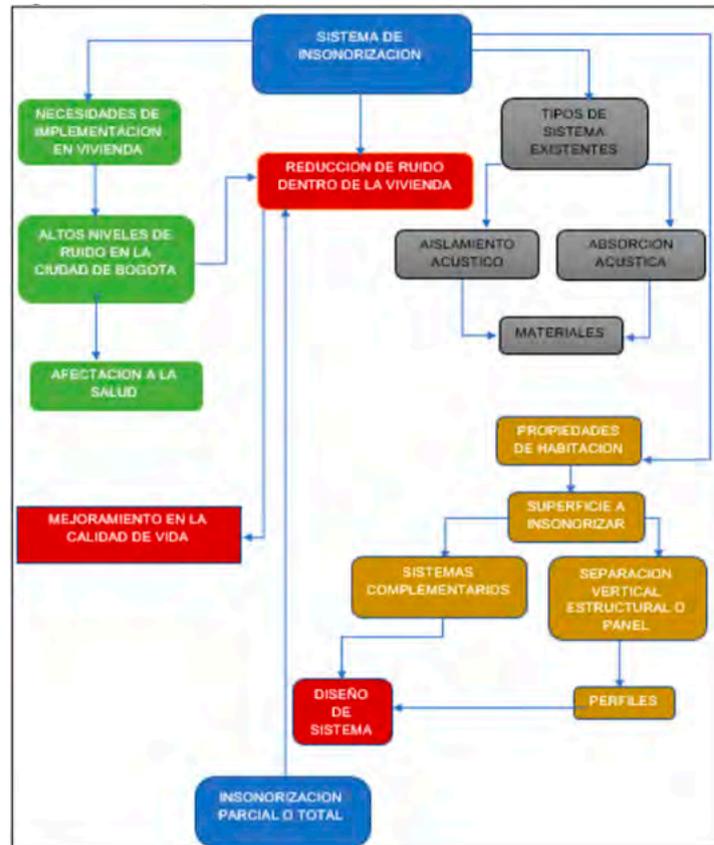


Figura 4: Esquema de diseño de sistema de insonorización

Fuente: elaboración propia

Cada sistema de insonorización presentado, a continuación, describe la aplicación del mismo, así como la recomendación de diseño general que se puede ver modificada según los requerimientos de cada vivienda. Igualmente, se recomiendan los materiales a utilizar en cada sistema; en su mayoría sostenibles y de fácil adquisición como se presenta en la sección de materiales previamente explicada y se especifican las condiciones de cada material y sus utilidades.

Cabe aclarar que los materiales en cuestión, son los que se encuentran en el mercado para uso de aislamiento

acústico y generan el menor impacto ambiental; se podrán utilizar materiales no convencionales de otras especificaciones siempre y cuando estos cuenten con una ficha técnica que cumpla con los distintos requerimientos de aislamiento acústico y resistencia. Estos materiales se pueden obtener mediante distintos orígenes, procesos de fabricación y pruebas de laboratorio como la presentada en el artículo científico “Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de kenaf” [12].

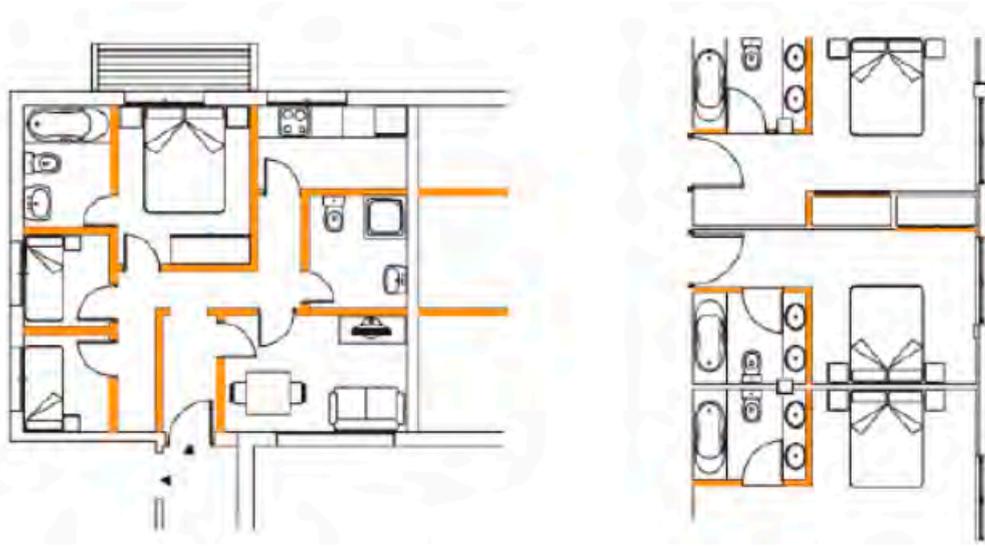


Figura 5. Muros divisorios interiores en vivienda

Fuente: Guía de soluciones constructivas, p.28.

Sistema de insonorización 1. Se utiliza para muros divisorios en el interior de las viviendas, por lo tanto, el nivel de ruido que deben aislar estos es bajo y se concentra más en los ruidos generados por sus habitantes, en específico, fuentes emisoras de ruido por actividades domésticas y ocio. Son muros que se encuentran en la parte interna de las viviendas y no deben soportar cargas altas de peso, impactos frecuentes, desgaste por factores climáticos o uso constante.

Las capacidades de diseño del sistema de insonorización para estos muros son las menores utilizando para estos

materiales con menor capacidad aislante y un diseño simplificado que consta de una estructura autoportante simplificada y medios aislantes y absorbentes de bajos requerimientos. Se realizará mediante un sistema de tabiques compuestos véase figura 6 donde se manejarán las siguientes especificaciones: Tabiques autoportantes de espesores diferentes conformados por tableros de madera de alta densidad, medio absorbente en corcho o fibra de madera, estructura en madera HDF con base en montantes separados y canales, ancho del sistema mayor a 80 mm.

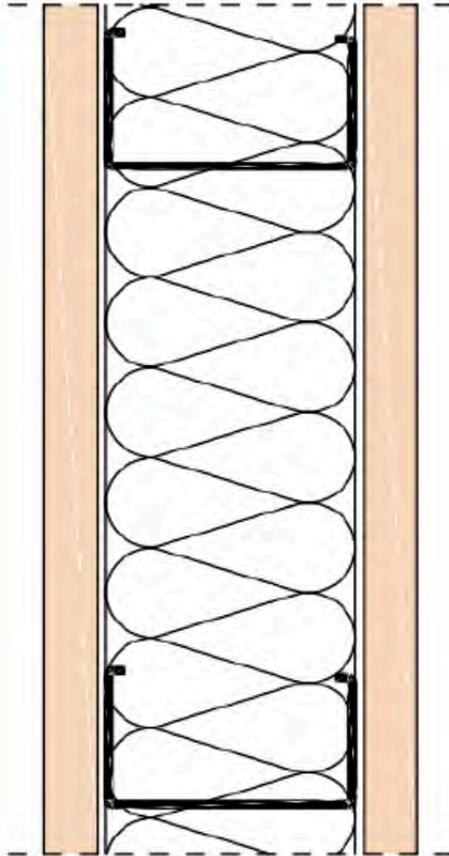


Figura 6. Sistema de insonorización 1
Fuente: Guía de soluciones constructivas

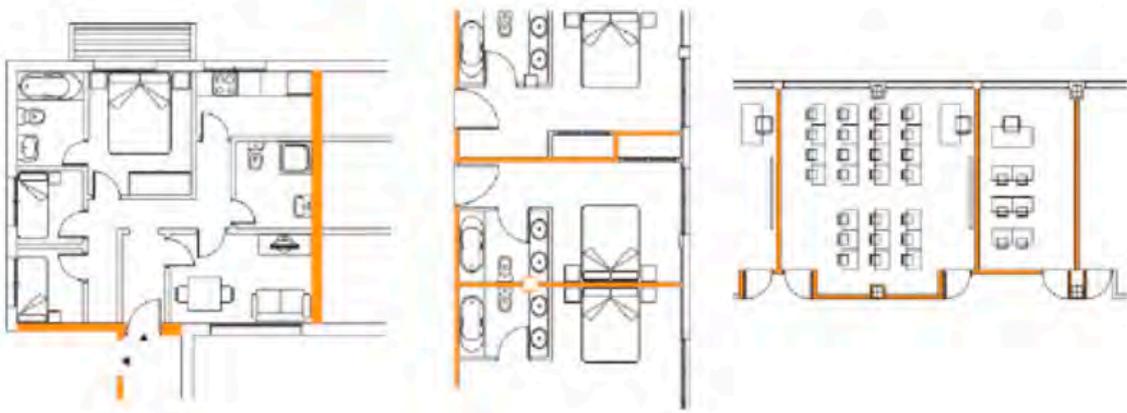


Figura 7. Elementos de separación vertical
Fuente: Guía de soluciones constructivas Sistema de insonorización 2.

Se utiliza para muros divisorios en el exterior de las viviendas conectando a estas con zonas comunes u otras viviendas, por lo tanto, el nivel de ruido que deben aislar estos es medio y se concentra mayormente en los ruidos generados por los habitantes de la misma edificación, pequeños locales comerciales ubicados en esta y vehículos ubicados en parqueaderos privados, así como en las área de servicios generales de la edificación como ascensores, equipos de bombeo, servicios de aseo.

Debido a que son muros que se encuentran en la parte externa de las viviendas conectadas a zonas comunes, deben soportar sobre todo, cargas medias como apoyo de varias personas sobre estos en periodos cortos de tiempo, además de que en algunos casos reciben impactos frecuentes, desgaste por factores climáticos o uso constante. Las capacidades de diseño del sistema de insonorización para

estos muros son medias debido a que requieren de una resistencia de diseño para evitar ataques físicos y climáticos. En estos casos, se utilizan materiales con menor capacidad aislante en la parte interna de la vivienda y material aislante de mayor capacidad, resistente en la parte exterior de la misma. Cuenta con un diseño de complejidad media que consta de una estructura autoportante de resistencia media y materiales absorbentes con altos requerimientos.

Se realizará para la separación de zonas comunes y vivienda un sistema de tabiques compuestos (véase figura 8) donde se manejarán las siguientes especificaciones: Doble tabique autoportante de PYL exterior (zonas comunes), tabique autoportante de HDF interior, doble estructura metálica no arriostrada a base de montantes separados y canales, cámara de aire, con medio absorbente en lana mineral, ancho del sistema mayor a 150mm

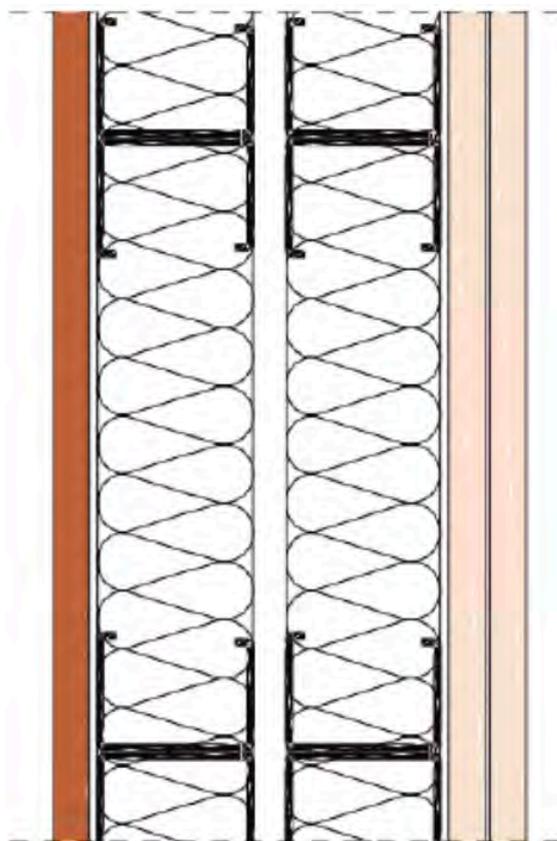


Figura 8. Sistema de insonorización 2
Fuente: Guía de soluciones constructivas

Sistema de insonorización 3.

Se utiliza para muros divisorios en el exterior de las viviendas conectando a estas con zonas comunes, por lo tanto, el nivel de ruido que deben aislar estos, es medio y se concentra más en los ruidos generados por los habitantes de la misma edificación, pequeños locales comerciales y vehículos ubicados en parqueaderos privados o zonas de servicios generales de la edificación como ascensores, equipos de bombeo, servicios de aseo.

Debido a que son muros que se encuentran en la parte externa de las viviendas que conectan a zonas comunes, deben soportar cargas medias tales como apoyo de varias personas en periodos cortos de tiempo, además de que en algunos casos reciben impactos frecuentes, desgaste por factores climáticos o uso constante de estos muros. Las capacidades de diseño del sistema de insonorización para

estos muros son medias debido a que requieren de una resistencia de diseño para evitar ataques físicos y climáticos, utilizando para estos materiales con menor capacidad aislante pero de mayor resistencia en la parte interna de la vivienda y material aislante de mayores capacidades y resistente en la parte exterior de la misma, cuenta con un diseño de complejidad media que consta de una estructura autoportante de resistencia media y materiales absorbentes con altos requerimientos.

Se realizará para separación entre zonas comunes mediante un sistema de tabiques compuestos véase figura 9 donde se manejarán las siguientes especificaciones: Doble placa autoportante de PYL, doble estructura metálica no arriostrada a base de montantes separados y canales, con medio absorbente en lana mineral, cámara de aire, ancho del sistema mayor a 170mm

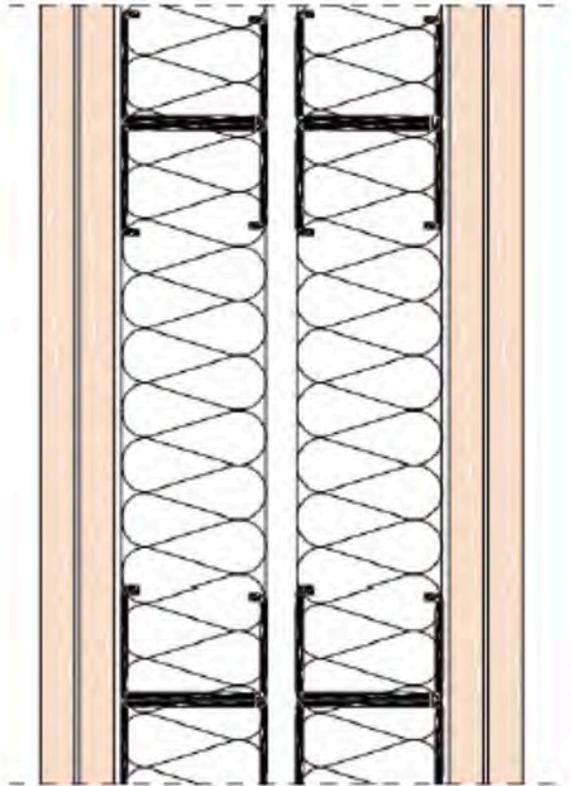


Figura 9. Sistema de insonorización 3
Fuente: Guía de soluciones constructivas

Elementos de separación vertical estructurales

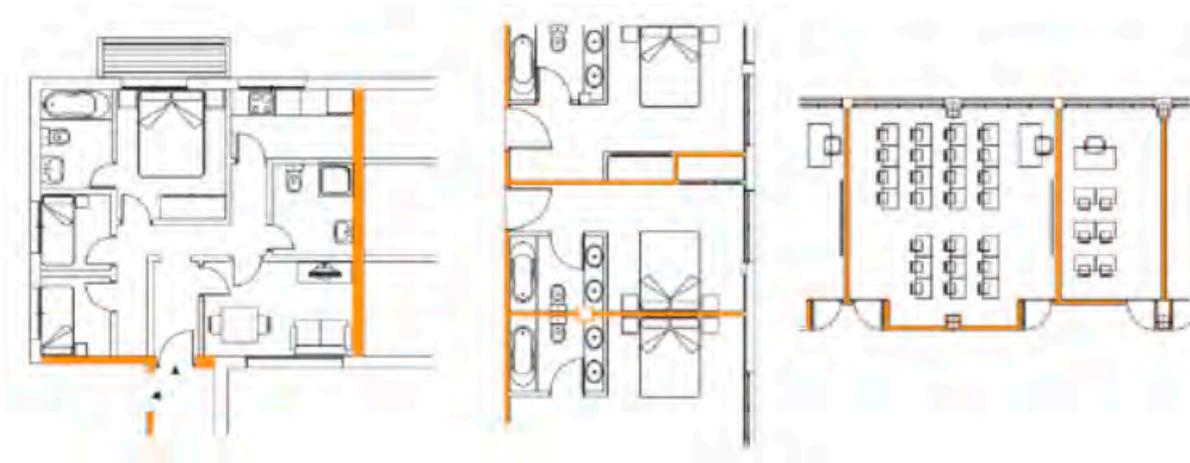


Figura 10. Elementos estructurales de separación vertical
Fuente: Guía de soluciones constructivas

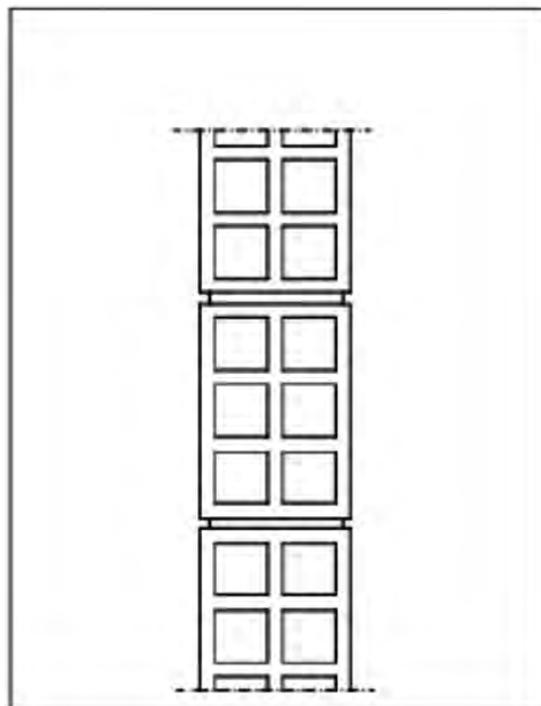


Figura 11. Silueta de muro estructural
Fuente: guía de soluciones constructivas

Sistema de insonorización 4.

Se utiliza para complementar los muros estructurales que no pueden ser reemplazados por su aporte a la resistencia de la estructura y que se encuentran ubicados tanto en el interior como en el exterior de las viviendas, conectando a estas con las zonas comunes; por lo tanto, el nivel de ruido que deben aislar estos es medio y se concentra más en los ruidos generados por los habitantes de la misma edificación, pequeños locales comerciales ubicados en esta y vehículos ubicados en parqueaderos privados, así como los servicios generales de la edificación como ascensores, equipos de bombeo, servicios de aseo.

Debido a que son muros que se encuentran la mayoría de las veces, en la parte externa de las viviendas conectándolas a zonas comunes, deben soportar cargas medias tales como apoyo de varias personas sobre estos mayormente en lapsos cortos de tiempo, además de que en algunos casos reciben impactos frecuentes, desgaste

por factores climáticos o uso constante de estos muros. Las capacidades de diseño del sistema de insonorización para estos muros son medias debido a que requieren de una resistencia de diseño para evitar ataques físicos y climáticos. Se utilizan materiales con menor capacidad aislante y absorbente, cuenta con un diseño de complejidad dado el muro estructural y aporta aislamiento acústico según el material con el que es construido (véase tabla 2). El sistema de insonorización consta de una estructura autoportante de resistencia media y materiales absorbentes con bajos y medios requerimientos según el muro estructural a complementar. Se realizará insonorización de elementos de mampostería estructural un sistema de trasdosados autoportantes, véase figura 12, donde se manejarán las siguientes especificaciones: Trasdoso autoportante en ambos lados en PYL o HDF, guarnecido de yeso en ambos lados, trasdosados arriostrados, con medio absorbente en lana mineral o corcho, cámara de aire en cada lado, ancho del sistema mayor a 200 mm + ancho del muro estructural.

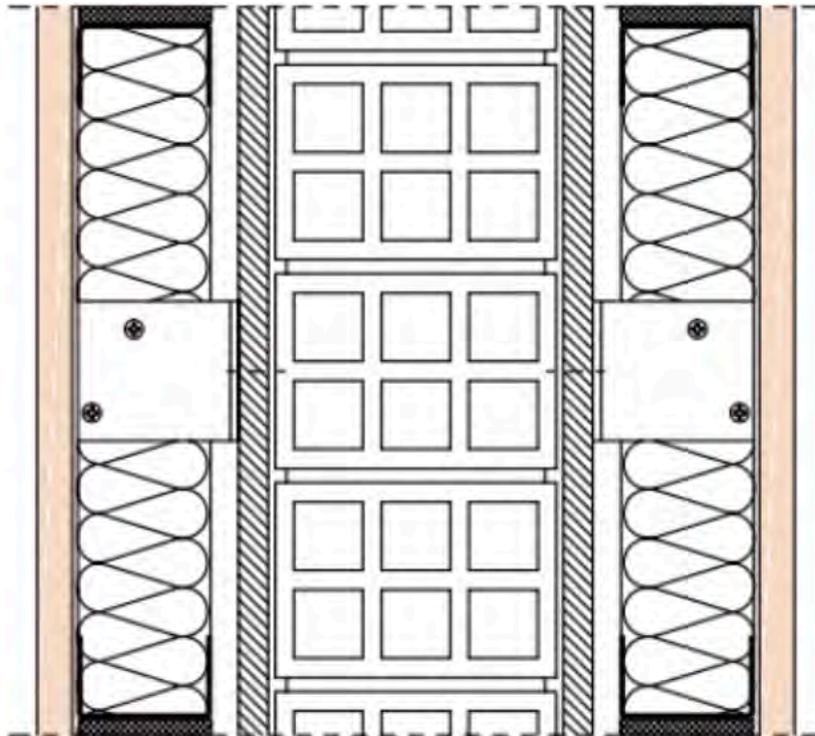


Figura 12. Sistema de insonorización 4

Fuente: Guía de soluciones constructivas

Sistema de insonorización 5. Se utiliza para complementar los muros estructurales que no pueden ser reemplazados por su aporte a la resistencia de la estructura, y que se encuentran ubicados en el interior de las viviendas. El sistema de insonorización no debe soportar cargas altas tales como apoyo de varias personas sobre estos, impactos frecuentes, desgaste por factores climáticos o uso frecuente sobre el sistema. Las capacidades de diseño del sistema de insonorización para estos muros son las menores y se utiliza para estos materiales con menor capacidad aislante y un diseño simplificado en un solo lado del muro (el lado que reciba la mayor cantidad de ondas de sonido) que consta de

una estructura autoportante simplificada y medios aislantes y absorbentes de bajos requerimientos. Debido a que son muros que se encuentran en la parte interna de las viviendas y su principal función es de aporte estructural

el sistema de insonorización no debe contar con alta resistencia a cargas ni condiciones climáticas o desgaste.

Las capacidades de diseño del sistema de insonorización para estos muros son bajas debido a que requieren de una resistencia de diseño nula para evitar ataques físicos y climáticos, utilizando para este sistema materiales con menor capacidad aislante, cuenta con un diseño de complejidad media que consta de una estructura autoportante de resistencia baja y materiales absorbentes con bajos requerimientos. Se realizará insonorización de elementos de mampostería estructural, un sistema de trasdosados autoportantes interior tipo mixto. Véase figura 13 donde se manejarán las siguientes especificaciones: Trasdoso autoportante en PYL o HDF, guarnecido de yeso, trasdoso arriostrado, con medio absorbente en lana mineral o corcho, cámara de aire, ancho del sistema mayor a 100 mm + ancho del muro estructural.

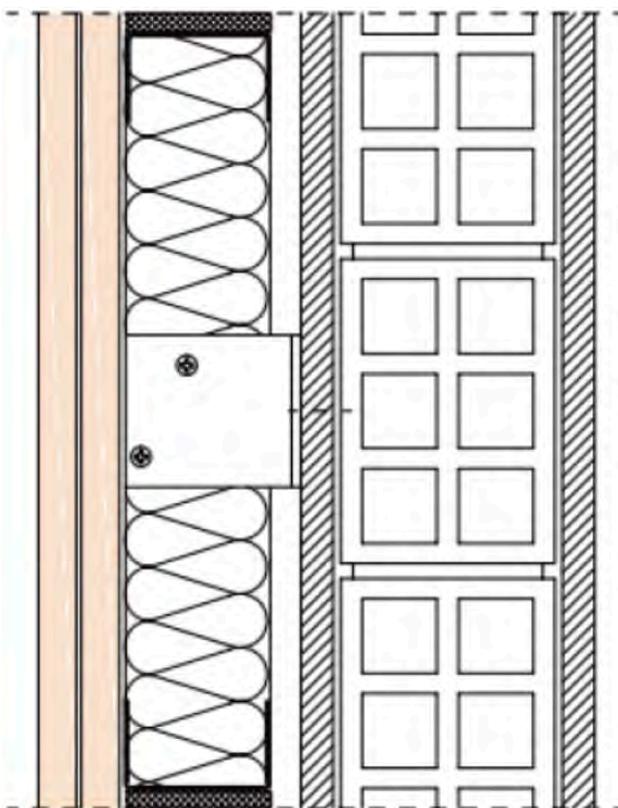


Figura 13. Sistema de insonorización 5

Fuente: Guía de soluciones constructivas

Fachadas

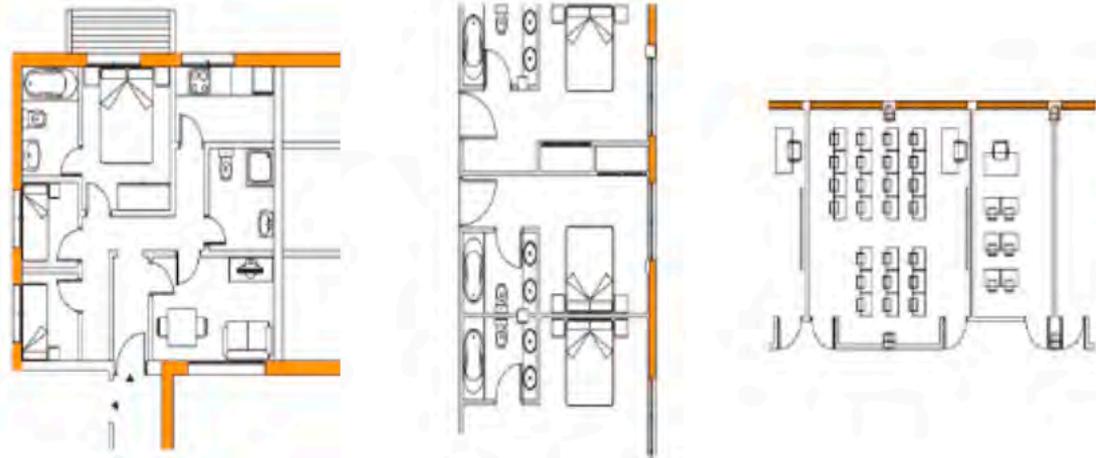


Figura 14. Fachadas

Fuente: Guía de soluciones constructivas

Sistema de insonorización 6.

Se utiliza para complementar los muros externos de la edificación que no pueden ser reemplazados por su aporte al recubrimiento de la misma; se encuentran ubicados en el exterior de las viviendas que están más conectadas a la calle o a zonas comunes expuestas a la intemperie. Por lo tanto, el nivel de ruido que deben aislar estos materiales es alto y se concentra más en los ruidos generados por tráfico e industria de distintas especificaciones. Las fuentes emisoras de ruido que debe aislar este sistema son las que más afectan a los habitantes de viviendas como se especifican en el presente documento tráfico e industria.

Debido a que son muros que se encuentran en la parte externa de las viviendas y son los que reciben la mayor cantidad de ruido urbano, que ubican el sistema de insonorización en la parte interna de la vivienda se debe soportar más las condiciones climáticas por los cambios de temperatura, así como un recubrimiento especial para evitar el desgaste del mismo por filtraciones de agua y factores biológicos, tales como hongos o plagas que intenten dañar el sistema. Las capacidades de diseño del sistema de insonorización para estos muros son las más

altas debido a que requieren de una resistencia de diseño alta para evitar ataques físicos y climáticos. Para este sistema se deben utilizar materiales con la mayor capacidad aislante, cuenta con un diseño de complejidad alta que consta de materiales y recubrimientos de altas capacidades, además de aislamiento y absorción de ondas de sonido con capacidades mayores a las de los sistemas previamente propuestos.

Cabe aclarar, que aunque el muro de la fachada aporte aislamiento acústico (véase tabla 2) el sistema de insonorización en esta debe contar con los mayores estándares de aislamiento para evitar la filtración del ruido que recibe al ser este ruido el más perjudicial para los habitantes de la vivienda. Se realizará insonorización de elementos de mampostería estructural un sistema de trasdosados autoportantes interior. Véase figura 15 donde se manejarán las siguientes especificaciones: Trasdoso arriostrado autoportante de PYL o HDF, Cámara de aire, recubrimiento de cemento, ladrillo perforado, lana mineral (preferiblemente en lana de vidrio), ancho del sistema superior a 200 mm.

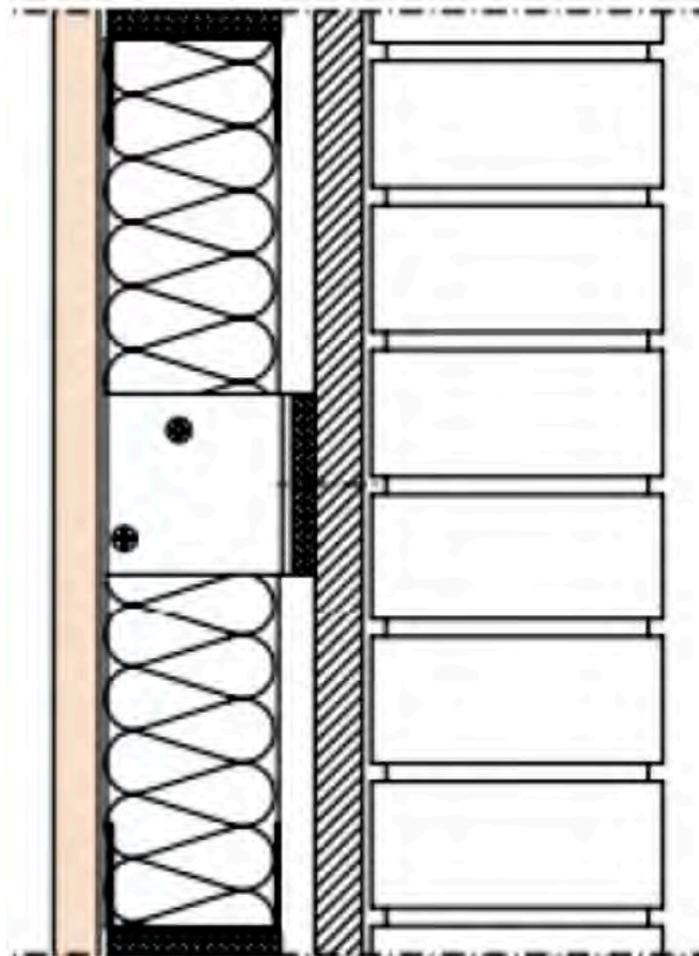


Figura 15. Sistema de insonorización 6

Fuente: Guía de soluciones constructivas

Nota: si el muro de la fachada no es estructural puede ser reemplazado por un sistema con mayores capacidades aislantes y resistentes, solicitando este un diseño especial enfocado tanto en el aislamiento acústico como en la resistencia máxima a los distintos ataques biológicos, climatológicos, físicos y químicos además de que requerirá de una impermeabilización de condiciones especiales, dados los materiales (sostenibles) utilizados para la realización del muro.

Sistemas de insonorización complementarios (Recomendados) insonorización en ventanas. Se utilizará sistema de doble vidriado hermético con lámina exterior en PVB en interior en vidrio convencional.

Insonorización en puertas. Serán utilizadas puertas conformadas por láminas de HDF pegadas a una capa interior, en aglomerado de corcho. Insonorización en pisos y techos. Ya que la insonorización en pisos requiere procedimientos costosos y se suele realizar en materiales altamente contaminantes como láminas en base de caucho sintético y láminas con base en bitumen, se hará únicamente insonorización en techos mediante el siguiente sistema: Estructura metálica suspendida con amortiguadores, doble lámina exterior de HDF y lámina interior en fibra mineral, cámara de aire con espesor mayor a 250 mm., espesor mínimo de 350 mm para insonorización en cubiertas. Se realizará mediante cubiertas ecológicas con la metodología propuesta en las EcoCubiertas. [13].

Conclusiones

- Se plantean sistemas de insonorización con materiales sostenibles (aunque se requieren otros materiales que complementen estos sistemas, en algunos casos) en muros de viviendas tanto unifamiliares como multifamiliares se puede reemplazar la mampostería no estructural y complementar los elementos estructurales de las mismas, sin afectar la estructura de ningún modo. Los sistemas son adaptables a cualquier tipo de vivienda y espacio, así como pueden mitigar parcial o totalmente las ondas de sonido brindando así un aislamiento acústico que haga cumplir las distintas normativas de ruido permisible, lo que brinda una mejor calidad de vida de los habitantes de las viviendas.
- La ciudad de Bogotá se encuentra ante una problemática de ruido preocupante debido a que, en la mayor parte de esta, las emisiones de ruido superan en gran medida las normativas y recomendaciones estipuladas. Esta situación afecta de modo gradual a los habitantes de la ciudad y en mayor medida ocurre en horas del día en las áreas más vulnerables, que son las que se encuentran más cerca a sectores de alto tráfico, tanto vehicular como aéreo, y sectores comerciales. Por lo tanto, se deben implementar medidas de regulación acústica, y ya que en muchos casos las medidas de regulación mediante autoridades ambientales no pueden ser impuestas por la dificultad de hacerlas efectivas, es necesario aplicar sistemas de aislamiento acústico en viviendas y prevenir así, repercusiones a corto y largo plazo en los habitantes de la ciudad.
- Hay todo tipo de sistemas de insonorización para viviendas, y cualquier tipo de espacios, que pueden ser conformados por materiales sostenibles y renovables, los cuales según sus especificaciones técnicas cumplen de igual o mejor forma los requerimientos de aislamiento y absorción acústica, que algunos materiales altamente contaminantes y mayormente utilizados. Los sistemas de insonorización cubren por completo cada aérea de las habitaciones que quieren contar, con un completo aislamiento

acústico tanto muros como pisos, techos, puertas, ventanas, mecanismos de servicio, etc., al igual que se puede realizar aislamiento acústico en las fachadas y cubiertas de las estructuras, todo esto mediante sistemas de insonorización amigables con el medio ambiente.

- Teóricamente se pueden realizar diseños de sistemas de insonorización con distintos niveles de complejidad que funcionan para el aislamiento acústico de las viviendas según las áreas que se requieran insonorizar; los sistemas de insonorización presentados cumplen con las especificaciones normativas tanto constructivas como ambientales, y pueden realizar variaciones de los mismos modificando dimensiones y materiales para lograr resultados esperados de aislamiento acústico y espacios arquitectónicos.
- En ciudades desarrolladas del mundo como Barcelona y Madrid, donde los problemas de ruido son realmente preocupantes la utilización de sistemas de insonorización es cada vez más común y requerida por sus habitantes, y sin importar el tema de sobrecostos que estos puedan generar, la comunidad es más consiente de la necesidad del cuidado de su salud ante la contaminación por ruido y por lo tanto un alto porcentaje de estas personas están dispuestas a pagar dichos sobrecostos.

Referencias bibliográficas

- Camacho, C. [et al.]. (2009). Terrazas ecológicas, ciudades que respiran, *Construdata*, Diseños y proyectos. ISSN 2322-6552.
- Colombia. Secretaría Distrital de Ambiente. Línea Base Ambiental. (2008). *Estado del Ambiente en Bogotá D.C.* Bogotá D.C.
- De la Rosa, M. (2000). *Ruido Industrial y Urbano*. Madrid: Paraninfo, pp. 240.
- España, Observatorio de Salud y Medio Ambiente de Andalucía (OSMAN). (2012). *Ruido y Salud. Sevilla.*

- Jiménez, J., Gil, C. (2015). Efectos en salud del ruido de tráfico: Más allá de las “molestias”. *Revista de Salud Ambiental*, vol. 15, no 2, pp. 125.
- Jiménez, J., Santiago, C., Gil, C. (2006). Ruido y Salud. Documento <http://www.sorolls.org/docs/ruido-y-salud.Htm>
- Pacheco, J., Franco, J.F., Behrentz, E. (2009). Caracterización de los niveles de contaminación auditiva en Bogotá: Estudio piloto. *Revista de Ingeniería*, No 30, (pp. 72-80)
- Resolución 0627. Por la cual se adopta la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá D.C., Colombia, 7 de abril, 2006.
- Rougeron, C. (1977). Aislamiento acústico y térmico en la construcción. Reverte.
- Salinas, J. Acústica Arquitectónica.
- Sobreira, M. A. (2006). *Acústica arquitectónica, implicaciones del CTE-DB HR y del reglamento de la ley del ruido*. Sonitum.org, España: Universidad de Vigo, Vigo-España.
- Soriano, J., et al. (2010). *Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de kenaf*. En *Materiales de construcción*. Ciudad: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) (pp. 133-143).
- Suiza. World Health Organization. (1999). WHO, *Guidelines for Community Noise*. ed. *Occupational and Environmental Health Team*. Geneva: Berglund, Birgitta, Lindvall, Thomas, Schwela, Dietrich H & World Health Organization.

Falla súbita de un suelo cohesivo solicitado cíclicamente

Patiño N. C. H., Martínez R. E., Galindo A. R.

Universidad Politécnica de Madrid, Calle del Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España
hernan.patino@upm.es

Resumen

Este artículo se presenta como una propuesta de metodología que permite evaluar el riesgo de *falla súbita* que puede experimentar un suelo cohesivo blando, cuando es solicitado tanto estática como dinámicamente. La propuesta tiene el respaldo de un amplio programa experimental en el que, además de ensayos de identificación y clasificación, se realizaron 16 pruebas de corte simple mono tónico y 139 de corte simple cíclico, a las que se aplicaron previa a la solicitud dinámica, diferentes niveles de esfuerzos cortantes mono tónicos. Las pruebas de laboratorio se realizaron sobre muestras inalteradas provenientes del puerto de Barcelona, ubicado en España. En general, los resultados obtenidos indican que: a) La combinación de esfuerzos mono tónicos y cíclicos controla la generación de presión de poros. b) Un suelo cohesivo puede experimentar *falla súbita* cuando los esfuerzos efectivos verticales, bajo la acción dinámica, se reducen hasta en un 70% y no en un 100% como ocurre con los medios granulares cuando son afectados por el fenómeno de licuefacción. c) La presión de poros generada durante la sollicitación cíclica controla el riesgo de *falla súbita* y d) Mediante correlaciones sencillas entre el módulo de rigidez, los esfuerzos efectivos, las deformaciones cíclicas y el número de ciclos es posible combinar familias de gráficas que permiten evaluar el riesgo de *falla súbita*.

Palabras clave: *falla súbita*, suelo cohesivo, corte simple cíclico.

Abstract

This article is presented as a proposal of methodology that allows to evaluate the risk of “sudden failure” that a soft cohesive soil can experience, when it is requested both statically and dynamically. The proposal has the backing of a broad experimental program in which, in addition to identification and classification tests, 16 monotonic simple cut and 139 single-cut cyclic tests were carried out, in which different levels of stress were applied previously to dynamic sollicitation. monotonic cutting Laboratory tests were performed on undisturbed samples from the Port of Barcelona located in Spain. In general, the obtained results indicate that: a) the combination of monotonic and cyclic efforts controls the generation of pore pressure, b) a cohesive soil can experience “sudden failure” when the vertical effective efforts, under the dynamic action, are reduced up to 70% and not 100% as it happens with granular media when affected by the phenomenon of liquefaction, c) pore pressure generated during cyclic sollicitation controls the risk of “sudden failure” and d) by simple correlations between the rigidity module, the effective forces, the cyclic deformations and the number of cycles it is possible to combine families of graphs that allow to evaluate the risk of “sudden failure”.

Keywords: “sudden failure”, cohesive soil, simple cyclic cutting.

Introducción

En términos generales, para la comunidad geotécnica mundial ha sido de mayor atención estudiar y profundizar en el conocimiento del comportamiento dinámico de los medios granulares, principalmente, en estado suelto por ser una condición de alto riesgo; en menor medida se ha investigado la respuesta de los suelos cohesivos cuando son solicitados dinámicamente.

El comportamiento de suelos cohesivos solicitados dinámicamente, conviene estudiarlo no solamente por el hecho de que en el pasado no haya sido motivo de máxima atención, sino porque en general en el mundo el desarrollo de los modelos matemáticos ha sido muy acelerado, respecto al avance relacionado con la evaluación realista de los parámetros con los que se alimentan los modelos. Ello da lugar a que se encuentran subutilizados y/o simplemente a que los resultados no sean absolutamente fiables.

En esta investigación se estudia la influencia que tiene la combinación de esfuerzos tangenciales estáticos y dinámicos en el comportamiento de un suelo cohesivo, cuando es solicitado dinámicamente bajo una estructura que se apoya sobre él y en el que la distribución de esfuerzos es muy compleja.

El objetivo conlleva idealizaciones como la indicada en la Figura 1, en la que se observa que algunas condiciones de esfuerzos pueden ser simuladas en el laboratorio mediante pruebas de corte simple cíclico y otras, mediante pruebas triaxiales cíclicas en unos casos de compresión y en otros de extensión.

Solamente se investiga la influencia, en la evaluación del riesgo de *falla súbita*, de la combinación de los esfuerzos

indicados con los números 1 y 3 en la Figura 1, por ser las condiciones que se idealizan mediante la prueba de corte simple cíclico.

En particular, se estudia el comportamiento de un suelo cohesivo cuando es solicitado a las combinaciones de esfuerzos indicadas, con puntos, en la Figura 2. La escala vertical corresponde al esfuerzo tangencial cíclico ($\Delta\tau_c$) normalizado respecto al esfuerzo efectivo vertical de consolidación de campo (σ'_{ov}) y la escala horizontal se corresponde con el esfuerzo tangencial estático (τ_o) normalizado respecto al esfuerzo efectivo vertical de consolidación de campo (σ'_{ov}).

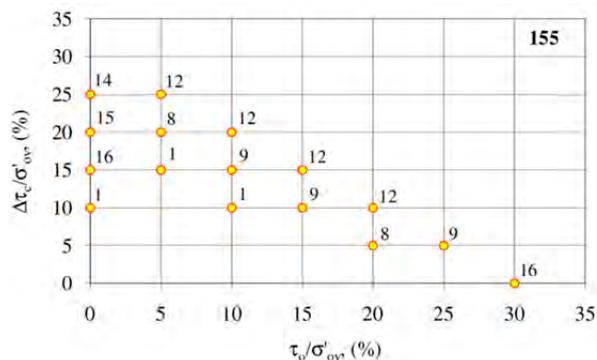
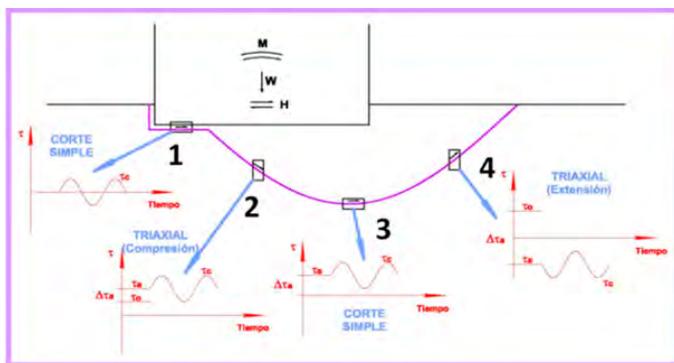


Figura 1. A la izquierda, idealización del estado de esfuerzos a lo largo de una hipotética superficie de falla.

Figura 2. A la derecha, combinación de esfuerzos durante la ejecución de los ensayos.

En la Figura 2 los puntos ubicados sobre el eje vertical en el origen de la escala horizontal, corresponden a estados de esfuerzos indicados con el N° 1 en la Figura 1; es decir, son casos en los que previamente a la sollicitación dinámica ($\pm \Delta\tau_c$) el esfuerzo tangencial estático (τ_o) es nulo. El resto de puntos corresponden a los estados de esfuerzos indicados con el N° 3 en la Figura 1; es decir, a las posibles combinaciones de esfuerzos tangenciales estáticos (τ_o) que sumados con los esfuerzos cíclicos ($\pm \Delta\tau_c$) sean menores o iguales a la resistencia al corte estática evaluada mediante pruebas de corte simple mono tónico.

En la Figura. 2 la resistencia al corte estática se ubica sobre el eje horizontal en el punto correspondiente a $\tau_o / \sigma'_{ov} \approx 0.3$ (30%).

Como se puede observar en la Figura 2, la investigación está orientada a conocer el comportamiento de un suelo cohesivo sollicitado a la combinación de esfuerzos tangenciales estáticos y cíclicos cercanos a la falla estática. Para ello, se realizaron pruebas con 15 configuraciones de esfuerzos diferentes.

El principal factor estudiado en esta investigación; es decir, la “falla súbita” que afecta a los suelos cohesivos blandos, puede ser comparado con el fenómeno de licuefacción que experimentan los medios granulares sueltos, cuando son sollicitados dinámicamente. La “falla súbita” y la licuefacción son fenómenos en los que los suelos experimentan, bajo sollicitación dinámica, pérdida drástica de resistencia al esfuerzo cortante y por tanto, grandes deformaciones.

Durante los últimos años, este tema ha sido motivo de estudio por parte de investigadores que en el pasado habían fijado su atención en el fenómeno de la licuefacción. Boulanger e Idriss (2004) orientaron sus investigaciones a la evaluación del potencial de licuefacción de limos y arcillas; proponen estimar, en función de la magnitud sísmica (M_w), el número equivalente de ciclos uniformes que generan ablandamiento. Sugieren que, desde el punto de vista práctico, el número equivalente de ciclos uniformes, para una magnitud igual a 7.5, se tome igual a 30. Boulanger e Idriss (2007) hacen referencia a la similitud que existe entre el fenómeno de licuefacción que afecta a las arenas en estado suelto y el ablandamiento cíclico que afecta a los limos y arcillas; para estimar si un suelo cohesivo tiende a presentar un comportamiento similar al de las arenas sueltas

y por tanto, es susceptible a ser afectado por el fenómeno de licuefacción, Boulanger et al. (2006) propusieron un criterio basado en la ubicación del suelo en la carta de plasticidad de Casagrande; además, proporcionan un esquema de tipo práctico que permite intuir si un suelo es susceptible a ser afectado por licuefacción a por ablandamiento cíclico.

Salvo algunas investigaciones, la literatura especializada reporta muy pocos casos en los que se ha estudiado el comportamiento dinámico de suelos cohesivos cuando son sollicitados con combinaciones de esfuerzos como las indicadas en la Figura 2. En otras palabras, solamente se han realizado ensayos de laboratorio que reproducen las condiciones de esfuerzos que en la Figura 2 se ubican en el origen sobre el eje vertical.

Autores como Seed y Chan (1986) y Andersen (1975) han realizado ensayos de laboratorio en los que han combinado esfuerzos estáticos sostenidos con esfuerzos cíclicos. Seed y Chan (1986) encontraron que en la medida en que se incrementa la magnitud del esfuerzo estático sostenido, a igual magnitud de esfuerzo cíclico, se reduce de manera significativa el número de ciclos necesarios para generar la falla. Andersen (1975) encontró que el nivel de esfuerzos efectivos controla el comportamiento de las arcillas sollicitadas cíclicamente y puede estar relacionado con la generación de presión de poros, con el desarrollo de deformaciones cíclicas y con el número de ciclos necesario para llegar a la falla.

Patiño (2009), Patiño y Soriano (2010), Soriano et al. (2011), Patiño et al. (2013) y Martínez et al. (2017) han estudiado recientemente el comportamiento tanto de suelos granulares como cohesivos, cuando son sollicitados por la combinación de esfuerzos tangenciales estáticos y cíclicos.

Descripción del suelo ensayado

El depósito del que se extrajeron las muestras utilizadas durante la etapa experimental de esta investigación, se ubica cerca de la desembocadura del río Llobregat en el mar Mediterráneo. El depósito hace parte del delta del Llobregat, figura 3, cuyo origen es aluvial del cuaternario reciente y más exactamente de la época holocénica.

En general, el delta está constituido por intercalaciones de arcillas, limos, limos arenosos y arenas finas que

- **Estrato 1.** Limos y arcillas de color variable entre marrón y gris, con tonalidades oscuras cuando se incrementa el contenido de materia orgánica. En la parte superior del estrato se encuentran intercalaciones de arenas y limos arenosos. El espesor de este estrato es cercano a los 50 metros.
 - **Estrato 2.** Gravas y arenas con alguna presencia de limos. El espesor de este estrato es de más o menos 7 metros.
 - **Estrato 3.** Arcillas con propiedades similares a las del estrato 1 pero con mayor densidad. El máximo espesor de este estrato es de 14 metros.
 - **Estrato 4.** Gravas y arenas con Interestratificaciones de arcilla. Su espesor supera los 40 metros.
- Las propiedades índice de las muestras ensayadas son las indicadas en la tabla 1. El contenido mineralógico evaluado mediante 13 determinaciones se incluye en la tabla 2.

Tabla 1. Resumen de propiedades índice.

Parámetro	Unidad	Datos	Rango
Densidad natural	Gr/cm ³	154	1,78 – 2,13
Humedad natural	%	154	15 – 44
Contenido de finos	%	154	86 – 100
D<2 μ	%	14	14 – 41
Límite líquido	%	39	24 – 45
Límite plástico	%	39	16 – 25
Índice de plasticidad	%	39	6 – 24
Gravedad específica		36	2,71 – 2,80

Tabla 2. Resumen del contenido mineralógico.

Mineral	%
Calcita	42
Cuarzo	26 – 36
Clorita	11 – 16
Albita	7 – 11
Moscovita	4 – 6

1. Descripción del equipo utilizado

Los ensayos se realizaron en un equipo de corte simple cíclico construido por la compañía Wykeham Farrance de

Ingllaterra, Figura 5, el cual se caracteriza por ser doblemente servocontrolado.

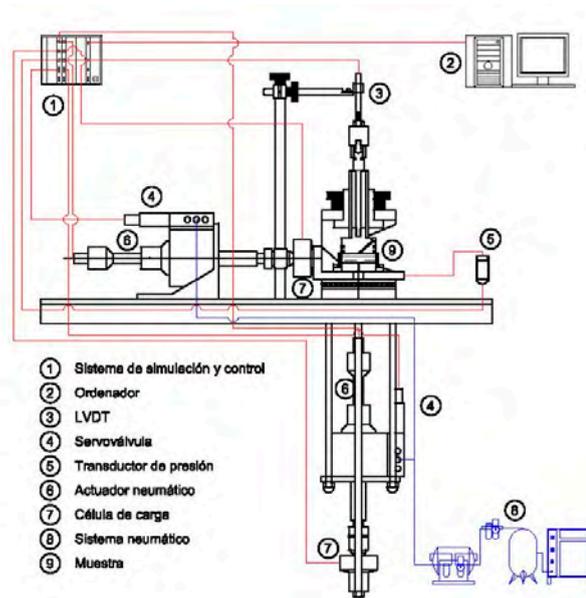


Figura 5. Equipo de corte simple cíclico fabricado Wykeham Farrance de Inglaterra.

El equipo es de acción neumática y requiere de un sistema de suministro de aire, que garantice como mínimo una presión de trabajo igual a 800 kPa.

La aplicación de cargas axiales y tangenciales se realiza mediante dos actuadores y dos servoválvulas controladas digitalmente. La capacidad de los actuadores es de ± 5 kN y la máxima frecuencia de trabajo de las servoválvulas es igual a 70 Hz.

Para medir las cargas axiales y tangenciales, el equipo está dotado con dos células de carga de 5 kN de capacidad y 1,2 N de precisión. Para el control y el registro de deformaciones axiales y tangenciales el equipo está dotado con tres LVDT; dos interiores, instalados dentro de los actuadores y uno exterior, ubicado encima del marco de carga axial.

La simulación, control y captura de datos se realiza mediante un panel conectado a un computador vía USB. El módulo de captura de datos tiene 13 canales de entrada de ± 10 V, con una resolución de adquisición igual a 20 bits y una velocidad de 5 kHz. El módulo de control tiene dos canales; uno destinado al actuador de carga vertical y el otro al actuador de la carga tangencial.

El conjunto panel de control – computador controla que las servo válvulas apliquen la carga con la velocidad, magnitud y tipo de onda prefijada y simultáneamente captura la información suministrada por las células de carga y los LVDT.

El equipo permite realizar ensayos en condiciones no drenadas (volumen constante) y condiciones drenadas (Carga axial contante).

Las dimensiones de la muestras son 70 mm de diámetro y 19 mm de altura. Para mantener constante el diámetro de la probeta, durante los ensayos, ésta se confina mediante una serie de anillos deslizantes.

2. Programa experimental

Todas las pruebas, tanto las de clasificación como las de corte simple mono tónico y cíclico, se realizaron con muestras provenientes del subsuelo del puerto de Barcelona, en particular con las obtenidas de los sondeos SA-1 y SA-2 situados como indica en la figura 6. Estos sondeos se hicieron sobre los cajones del muelle del Prat.

Manejo de las muestras

Al laboratorio de geotecnia de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, de la Universidad Politécnica

de Madrid, fueron enviadas un total de 29 muestras inalteradas tomadas con tubo Shelby. Se almacenaron en cámara de temperatura y humedad controlada.

A pesar de que usualmente se utilizan extractores comerciales para sacar las muestras de los tubos Shelby, en este caso en particular, no se hizo uso de este tipo de equipo, por considerar que, aunque común, es una práctica rechazable debido a que la presión que se aplica durante el proceso de extracción, comprime las muestras de manera significativa y en consecuencia las altera.

A fin de evitar la alteración causada por el proceso tradicional de extracción de las muestras de los tubos “Shelby”, se hizo uso de un corta-tubo y una prensa de tubería. Esto permite cortar las muestras de la altura necesaria, dependiendo del tipo de prueba que se tenga proyectado realizar, figura. 7.

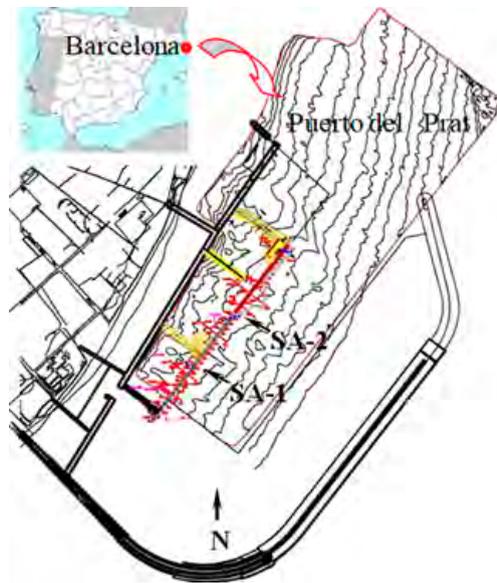


Figura 6. A la izquierda, situación de los sondeos SA-1 y SA-2, realizados en el puerto de Barcelona.

Figura 7. A la derecha, extracción de muestras haciendo uso de corta-tubo.

2.2 Propiedades índice

El tipo y número de ensayos de identificación y clasificación que se realizaron durante el desarrollo de esta investigación son los indicados en la tabla 1.

2.3 Corte simple mono tónico y cíclico

Lo ideal hubiese sido haber realizado igual número de pruebas para cada una de las combinaciones indicadas en la figura 2, pero no fue posible debido a que el número de probetas que se podían labrar dependía de la longitud de testigo recuperado, lo cual como es normal en cualquier campaña de exploración, no es constante y además el porcentaje de recuperación no siempre es igual al 100%. Finalmente, el número de pruebas realizado, para cada una de las combinaciones, es el indicado en la figura 2.

En la figura 2, (τ_0) corresponde al esfuerzo tangencial que se aplica estáticamente, previamente a la etapa de corte simple cíclico; (σ'_{ov}) al esfuerzo efectivo de consolidación y ($\pm \Delta\tau$) al esfuerzo cíclico. En todas las pruebas (σ'_{ov}) corresponde al valor (σ'_{ov}) de campo. Además, cuando ($\Delta\tau/\sigma'_{ov}$) es igual a cero, ($\tau_0/\sigma'_{ov} = 30\%$) corresponde, aproximadamente, al máximo esfuerzo axial normalizado obtenido mediante la prueba de corte simple mono tónico.

2.4 Condiciones generales de los ensayos

A fin de erradicar factores que pudieran tener influencia adicional a la combinación de esfuerzos estáticos y cíclicos en el comportamiento del suelo estudiado, se fijaron para todos los ensayos las condiciones relacionadas a continuación:

- Muestras inalteradas.
- Probetas de 7 centímetros de diámetro y 1.91 centímetros de altura.
- Presión de consolidación igual a la presión efectiva vertical "In situ" (σ'_{ov}). Debido a que las muestras ensayadas fueron extraídas mediante sondeos realizados sobre los cajones del muelle del PRAT, la presión efectiva de consolidación, aplicada sobre las muestras, se estimó mediante la siguiente expresión:

$$\sigma'_{ov} = \sigma'_{ovz} + \Delta\sigma'_z$$

Donde σ'_{ovz} es la presión efectiva in situ por peso propio del suelo, $\Delta\sigma'_z$ es el incremento de presión efectiva por acción de los cajones y z la profundidad a la que fue tomada la muestra.

- Condiciones no drenadas y evaluación de la presión de poros generada. De acuerdo con el criterio de Bjerrum y Landva (1966), las pruebas de corte simple a volumen constante son equivalentes a pruebas no drenadas; el cambio en el esfuerzo vertical aplicado sobre la muestra, es equivalente al cambio en la presión de poros que se generaría dentro de una muestra sometida a corte simple con drenaje restringido y esfuerzo axial constante. Esto fue verificado por Bjerrum mediante una prueba realmente no drenada en la que midió la presión generada en la base de la probeta.
- Finalización del ensayo para deformaciones permanentes (γ_p) iguales al 15%, o deformaciones cíclicas (γ_c) iguales al 15%, o número de ciclos (N) igual a 1300, o presión de poros evaluada igual al 95% de la presión de consolidación.
- Esfuerzo controlado durante la etapa cíclica.
- Onda sinusoidal con amplitud igual al esfuerzo cíclico ($\pm \Delta\tau_c$) y período igual a 10 segundos. Se eligió un período igual a 10 segundos para que los resultados de esta investigación pudieran, eventualmente, ser utilizados en etapas previas relacionadas con el diseño de obras portuarias en zonas cercanas a la zona donde se extrajeron las muestras. Es decir cerca al muelle del Prat.
- Deformación controlada durante la etapa mono tónica. La velocidad de deformación tangencial fue igual 0.015 milímetros por minuto, o igual al 4% por hora.

3. Interpretación de resultados

La evaluación e interpretación de la información se hace a partir de los resultados obtenidos mediante ensayos de clasificación y pruebas de corte simple, tanto mono tónicas como cíclicas.

Todos los ensayos se realizaron con muestras de un depósito cohesivo blando, extraídas del subsuelo de una zona, en particular, del puerto de Barcelona.

Identificación y clasificación del depósito

A partir de la observación y manipulación de todas las muestras utilizadas durante la etapa experimental de esta investigación, el depósito encontrado entre 30 y 52 metros de profundidad, respecto al nivel medio del mar, es de origen sedimentario constituido por intercalaciones muy delgadas de limos arcillosos o arcillas limosas de consistencia media a blanda, eventualmente algo orgánico. Color variable entre café oscuro y gris. Algunas intercalaciones de arena fina, con espesores variables entre 5 y 10 centímetros. Ambiente micáceo.

De acuerdo con la información incluida en la tabla 1, el depósito se puede considerar que está constituido por arcillas limosas de baja plasticidad.

La densidad natural, la humedad natural y el porcentaje de finos respecto a la profundidad, no tienen unas claras tendencias de variación, dado que sus distribuciones son muy erráticas. No obstante, como se puede observar en la tabla 1, sus valores se ubican dentro de rangos muy estrechos.

5.1 Corte simple mono tónico

El comportamiento típico observado en todas las muestras ensayadas (16) es el indicado en la Figura 8. La resistencia al corte no drenada máxima se desarrolla para deformaciones angulares muy grandes, variables entre el 12 y el 22%.

El comportamiento esfuerzo-deformación es típicamente plástico. La presión de poros generada durante la etapa de falla, en todos los casos, fue positiva. Ello indica

un comportamiento contractivo que pone en evidencia la presencia de un depósito poco consolidado ó normalmente consolidado.

Es usual, evaluar de manera aproximada el máximo esfuerzo tangencial desarrollado por los suelos mediante expresiones como la siguiente:

$$\tau_{m,m\acute{a}x.} = T \cdot \sigma'_{ov} \quad (1)$$

Donde τ_m es la resistencia al cortante no drenada en ensayo mono tónico, T es una constante adimensional y σ'_{ov} es el esfuerzo efectivo vertical "in situ".

Para el caso del suelo cohesivo estudiado el esfuerzo máximo se desarrolla para deformaciones muy grandes, lo cual podría ser inadmisibles para algún tipo de estructura apoyada sobre éste. Por ello se propone completar la expresión (1) con la (2). En la expresión (1) se reemplaza la constante (T) por una variable en función de la deformación angular y se obtiene la expresión (2) que tiene en cuenta la variación de la resistencia desarrollada en función de la deformación angular y la presión efectiva vertical *in situ*.

$$\tau_m = [0.07 \cdot \ln(\gamma_m) + 0.44] \cdot \sigma'_{ov} \quad (2)$$

Donde τ_m es la resistencia mono tónica desarrollada, γ_m es la deformación angular mono tónica y σ'_{ov} es el esfuerzo efectivo vertical *in situ*.

En la Figura 9 se observa que a la constante (T), igual a 0.3, utilizada en la expresión (1) para estimar la resistencia de estos suelos arcillosos le corresponde una deformación igual al 15%, lo cual podría ser inadmisibles. Para otros valores de la deformación angular que se produce, resultan las magnitudes de T que se aprecian en la Figura 9.

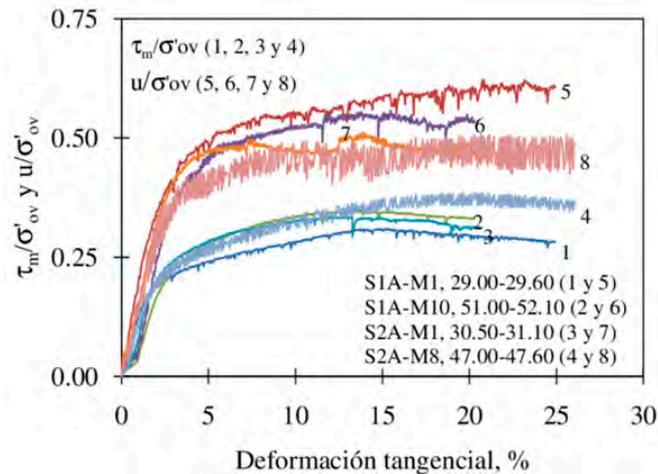
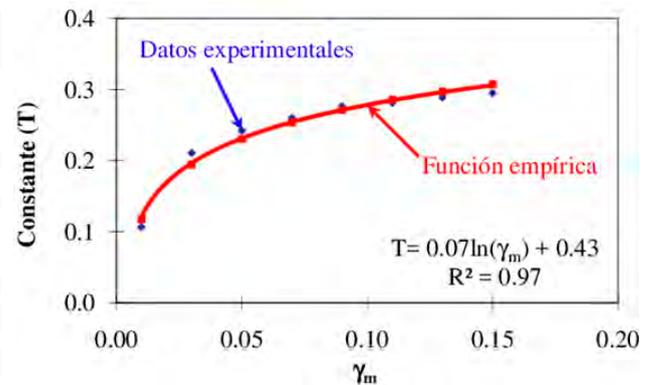


Figura 8. A la izquierda, variación del esfuerzo tangencial (τ) y la presión de poros (u), en función de la deformación angular mono tónica (γ_m).

Figura 9. A la derecha, función empírica para evaluar (T) en función de la deformación angular.



La expresión (2), al igual que la figura 9, puede ser útil si es incorporada en los códigos de simulación numérica que estén habilitados para tener en cuenta la variación de la resistencia al corte desarrollada por el suelo, en función de la deformación angular. Para la obtención de los parámetros de resistencia en términos de deformaciones angulares, Patiño (2009) se propone funciones.

5.2 Corte simple cíclico

La información incluida en este artículo hace parte de la recopilada mediante una investigación, Patiño (2009), en la que se estudió la influencia de la combinación de esfuerzos tangenciales mono tónicos (τ_o) y cíclicos (τ_c) en la evaluación de los parámetros dinámicos de un suelo cohesivos, tales como el módulo el rigidez (G), el amortiguamiento (ζ), las de formaciones cíclicas (γ_c), las deformaciones permanentes (γ_p) y la generación de presión de poros (u). Por limitaciones de espacio, en este artículo solamente se hace referencia a la *falla súbita*, pero en documentos independientes, Patiño et al. (2013) y Martínez et al. (2017) ya han divulgado algunos de los resultados.

Teniendo en cuenta lo anterior, la evaluación e interpretación de los resultados obtenidos mediante los ensayos de corte simple cíclico, se orienta hacia la propuesta

de una metodología que permita, de manera sencilla, intuir si un depósito cohesivo blando tiene riesgo de ser afectado por *falla súbita*.

La " de un suelo cohesivo podría ser considerada como un fenómeno similar al que afecta las arenas sueltas, cuando son solicitadas dinámicamente, debido a que también resulta afectado por pérdida de la totalidad de su resistencia al corte.

No se hará uso del término licuefacción por estar este reservado en la literatura al fenómeno mediante el cual las arenas flojas, solicitadas dinámicamente, experimentan pérdida total de la resistencia al esfuerzo cortante, como consecuencia del incremento súbito de la presión de poros y la anulación del esfuerzo efectivo vertical.

Módulo de rigidez (G) como una función del número de ciclos (N). Los resultados experimentales incluidos en la figura 10 corresponden a las tendencias de variación, típicas encontradas en esta investigación, del módulo de rigidez (G) normalizado respecto al esfuerzo efectivo vertical in situ (σ'_{ov}), en función del número de ciclos (N) y para deformaciones cíclicas (γ_c) variables entre el 1% y el 14%.

Haciendosecciones verticales, en la figura 10, por las ordenadas correspondientes a los números de ciclos

iguales a 1, 10, 100 y 1000 se obtienen las tendencias de variación del módulo de rigidez (G) normalizado respecto al esfuerzo efectivo vertical in situ (σ'_{ov}), en función de las deformaciones cíclicas (γ_c) y para número de ciclos (N) iguales a 1, 10, 100 y 1000. (Figura 11).

En términos generales, para efectos de modelización, en función de la deformación cíclica y para cada número de ciclos (N), el módulo de rigidez al cortante, normalizado respecto al esfuerzo efectivo vertical, podría ser estimado de manera aproximada mediante la expresión general (3).

$$\frac{G}{\sigma'_{ov}} = C_1 \cdot (\gamma_c)^{C_2} \quad (3)$$

Donde G es el módulo de rigidez al cortante, σ'_{ov} la presión efectiva vertical in situ, γ_c la deformación cíclica (%), C1 y C2 constantes empíricas. En el caso particular de esta investigación las constantes empíricas se incluyen en la tabla 3.

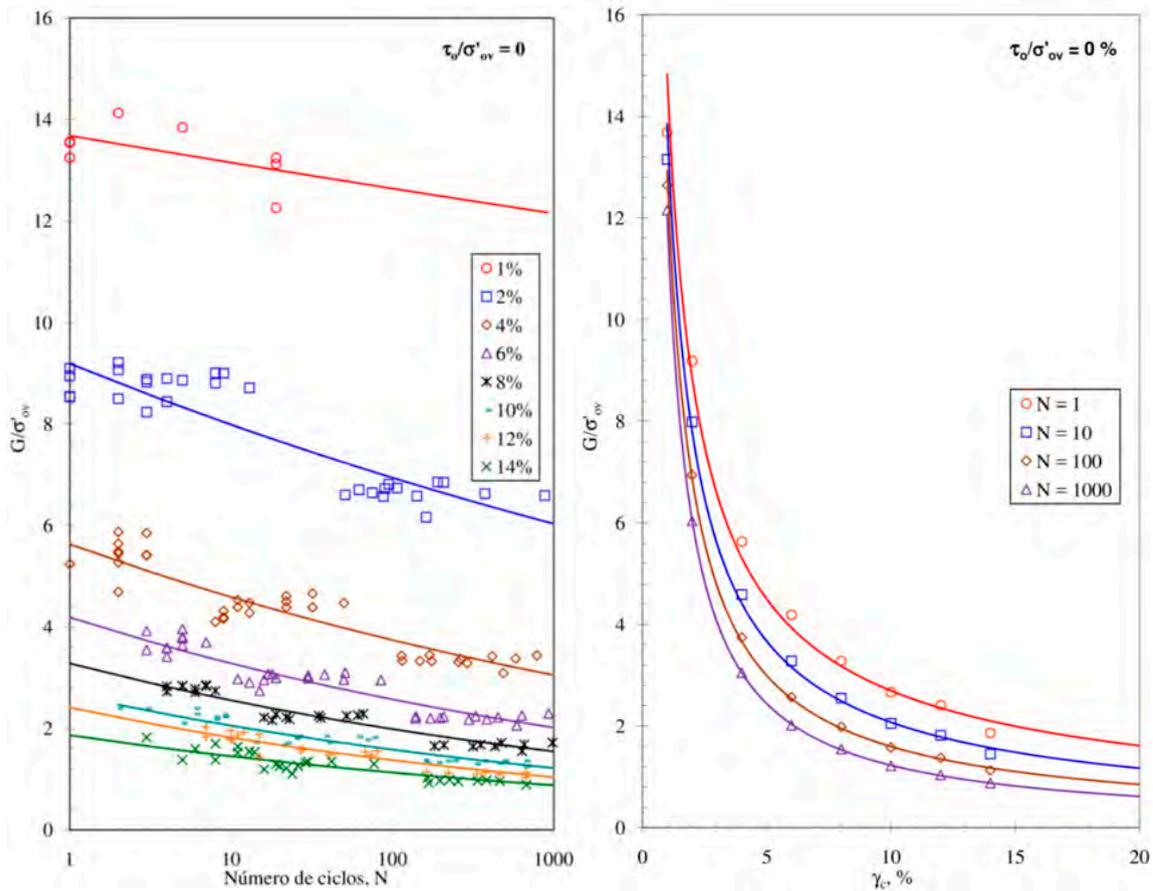


Figura 10. A la izquierda, N - G/σ'ov para diferentes valores de γ_c .
Figura 11. A la derecha, secciones verticales en la gráfica de la figura 10.
Figura 10. Para N iguales a 1, 10, 100, 1000.

A igual esfuerzo mono tónico normalizado (τ_0/σ'_{ov}), combinando la expresión (3) para diferente número de ciclos, se obtiene, en términos generales y para efectos de modelización, en función de la deformación cíclica y el número de ciclos (N), el módulo de rigidez al cortante, normalizado respecto a la presión efectiva vertical *in situ*. Esta estimación, de manera aproximada, se puede hacer mediante la expresión general (4).

$$\frac{G}{\sigma'_{ov}} = \left(C_3 \cdot N^{C_4} \right) \cdot (\gamma_c)^{(C_5 \cdot \ln N + C_6)} \quad (4)$$

Donde G es el módulo de rigidez al cortante, σ'_{ov} la presión efectiva vertical *in situ*, γ_c la deformación cíclica (%), N el número de ciclos y C_3 , C_4 , C_5 y C_6 , constantes empíricas. En el caso particular de esta investigación las constantes empíricas se incluyen en la tabla 4.

Tabla 3. Constantes empíricas C1 y C2

τ_0/σ'_{ov}	N	C1	C2
0	1	14,83	-0,74
0	10	13,84	-0,82
0	100	12,93	-0,91
0	1000	12,07	-0,99
5	1	20,15	-0,78
5	10	19,40	-0,87
5	100	18,67	-0,95
5	1000	17,97	-1,04
10	1	25,20	-0,92
10	10	24,10	-0,93
10	100	23,04	-0,93
10	1000	22,03	-0,94

Tabla 4. Constantes empíricas C3, C4, C5 y C6

τ_0/σ'_{ov}	C3	C4	C5	C6
0	15	-0,03	-0,04	-0,74
5	20	-0,02	-0,04	-0,78
10	25	-0,02	-0,002	-0,92

En la Figura 12a se presentan las tendencias de variación de G/σ'_{ov} , en términos de la deformación cíclica (γ_c) para

diferentes valores de número de ciclos (N) y τ_0/σ'_{ov} , obtenidas mediante la función empírica (4) propuesta.

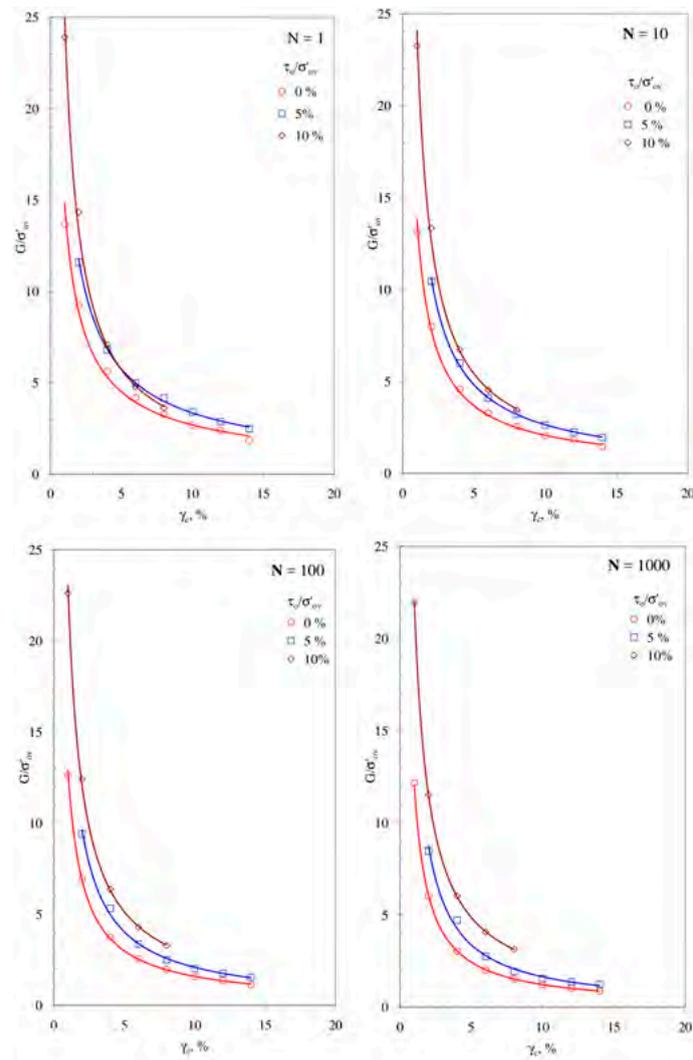


Figura 12. Tendencias de variación de G/σ'_{ov} , en términos de la deformación cíclica (γ_c) para diferentes valores de número de ciclos (N) y τ_o/σ'_{ov} .

Esfuerzo efectivo vertical (σ'_v) como una función del número de ciclos (N). Los resultados experimentales incluidos en la figura 13 corresponden a las tendencias de variación, típicas encontradas en esta investigación, del esfuerzo vertical efectivo (σ'_v) normalizado respecto al esfuerzo efectivo vertical *in situ* (σ'_{ov}), en función del número de ciclos (N) y para deformaciones cíclicas (γ_c) variables entre el 1% y el 14%.

Haciendo, en la figura 13, secciones verticales por las ordenadas correspondientes a números de ciclos iguales a 1, 10, 100 y 1000 se obtienen las tendencias de variación del esfuerzo vertical efectivo (σ'_v) normalizado respecto al esfuerzo efectivo vertical *in situ* (σ'_{ov}), en función de las deformaciones cíclicas (γ_c) y para número de ciclos (N) iguales a 1, 10, 100 y 1000. (Figura 14).

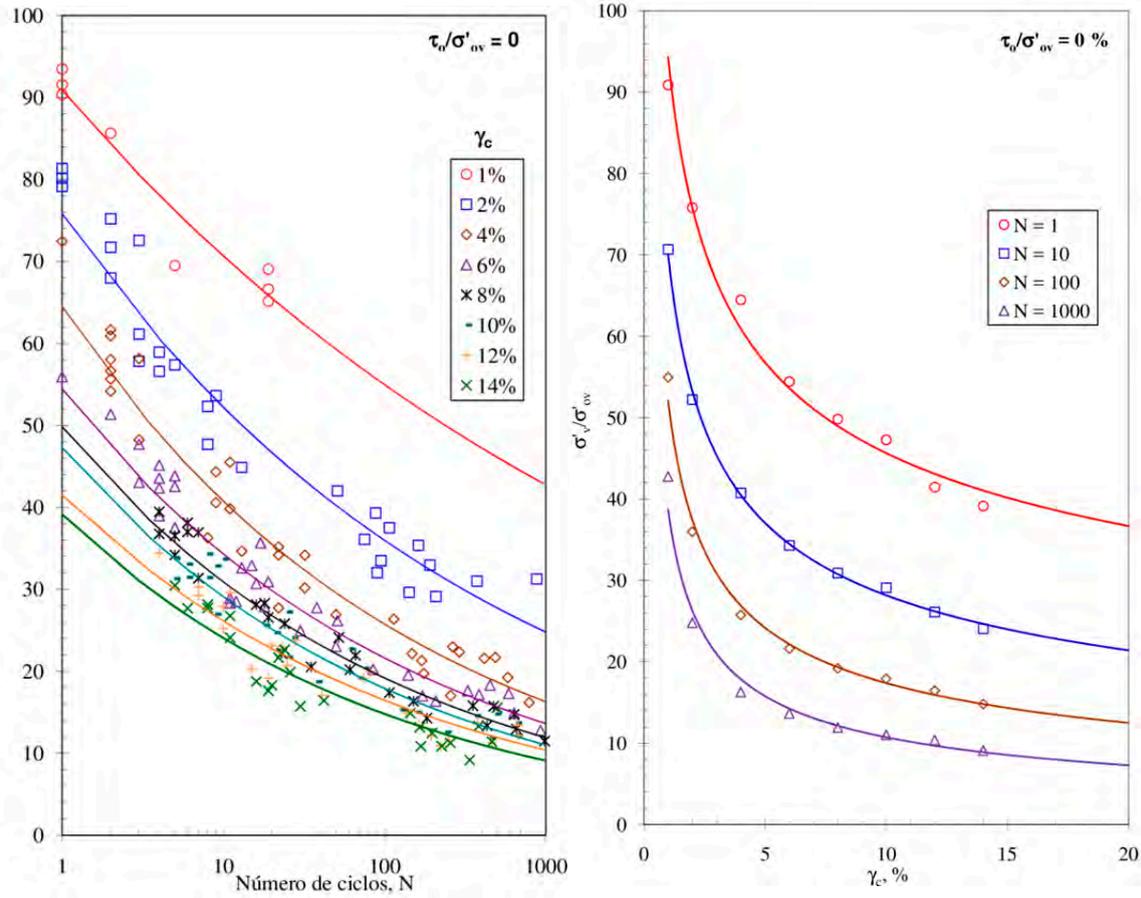


Figura 13. A la izquierda, $N - \tau_v/\sigma'_{ov}$, para diferentes valores de γ_c .

Figura 14. A la derecha, secciones verticales en la gráfica de la figura 13 para N iguales a 1, 10, 100, 1000.

En términos generales, para efectos de modelización, en función de la deformación cíclica y para cada número de ciclos (N), los esfuerzos efectivos, normalizados respecto al esfuerzo efectivo vertical, podrían ser estimados de manera aproximada mediante la expresión general (5).

$$\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{ov}} = C_7 \cdot (\gamma_c)^{C_8} \quad (5)$$

Donde σ'_o es el esfuerzo efectivo vertical, σ'_{ov} el esfuerzo efectivo vertical *in situ*, γ_c la deformación cíclica (%), C_7 y C_8 constantes empíricas. En el caso particular de esta investigación, las constantes empíricas se incluyen en la tabla 5.

Tabla 5. Constantes empíricas C7 y C8

τ_0/σ'_{ov}	N	C7	C8
0	1	94,35	-0,32
0	10	70,11	-0,40
0	100	52,09	-0,48
0	1000	38,70	-0,56
5	1	88,86	-0,22
5	10	66,25	-0,34
5	100	49,40	-0,46
5	1000	36,83	-0,58
10	1	87,34	-0,44
10	10	57,61	-0,36
10	100	38,00	-0,29

A igual esfuerzo mono tónico normalizado (τ_0/σ'_{ov}), combinando la expresión (5) para diferente número de ciclos, se obtiene, en términos generales y para efectos de modelización, en función de la deformación cíclica y el número de ciclos (N), el esfuerzo efectivo vertical normalizado respecto al esfuerzo efectivo vertical *in situ*. Esta estimación, de manera aproximada, se puede hacer mediante la expresión general (6).

$$\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{ov}} = \left(C_9 \cdot N^{C_{10}} \right) \cdot (\gamma_c) (C_{11} \cdot \ln N + C_{12}) \quad (6)$$

Donde σ'_v es la presión efectiva vertical, σ'_{ov} la presión efectiva vertical *in situ*, γ_c la deformación cíclica (%), N el número de ciclos, C_9 , C_{10} , C_{11} y C_{12} , constantes empíricas. En el caso particular de esta investigación, las constantes empíricas se incluyen en la tabla 6.

Tabla 6. Constantes empíricas C9, C10, C11 y C12

τ_0/σ'_{ov}	C9	C10	C11	C12
0	96	-0,13	-0,04	-0,32
5	89	-0,13	-0,05	-0,22
10	87	-0,18	0,03	-0,42

Módulo de rigidez (G) como una función del esfuerzo efectivo vertical (σ'_v) Combinando las expresiones (3) y (5) se encuentra para cada número de ciclos la correlación existente entre el módulo de rigidez al cortante y el esfuerzo efectivo vertical. Las expresiones encontradas y que se consideran útiles para efectos de la modelización son de la forma indicada en la expresión (7).

$$\frac{G}{\sigma'_{ov}} = C_{13} \cdot \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{ov}} \right)^{C_{14}} \quad (7)$$

Donde G es el módulo de rigidez al cortante, σ'_{ov} la presión efectiva vertical *In situ*, σ'_v la presión efectiva durante el ensayo de laboratorio y C_{13} y C_{14} constantes empíricas.

A igual esfuerzo mono tónico normalizado (τ_o/σ'_{ov}), combinando la expresión (7) para diferente número de ciclos, se obtiene, en términos generales y para efectos de modelización, en función de la presión efectiva vertical normalizada y el número de ciclos (N), el módulo de

rigidez, normalizado respecto a la presión efectiva vertical *in situ*. Esta estimación, de manera aproximada, se puede hacer mediante la expresión general (8).

$$\frac{G}{\sigma'_{ov}} = \left(C_{15} \cdot N^{C_{16}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{ov}} \right)^{\left(C_{17} \cdot \ln N + C_{18} \right)} \quad (8)$$

Donde G es el módulo de rigidez, σ'_v es el esfuerzo efectivo vertical, σ'_{ov} el esfuerzo efectivo vertical *in situ*, N el número de ciclos y C_{15} , C_{16} , C_{17} y C_{18} , constantes empíricas.

Los resultados obtenidos mediante la expresión (8), incluidos en la figura 15, corresponden a las tendencias de variación, típicas encontradas en esta investigación, del módulo de rigidez (G) normalizado respecto al esfuerzo efectivo vertical “*in situ*” (σ'_{ov}), en función del esfuerzo efectivo vertical normalizado respecto al esfuerzo efectivo vertical *in situ* (σ'_v), y para un número de ciclos igual a 1, 10, 100 y 1000.

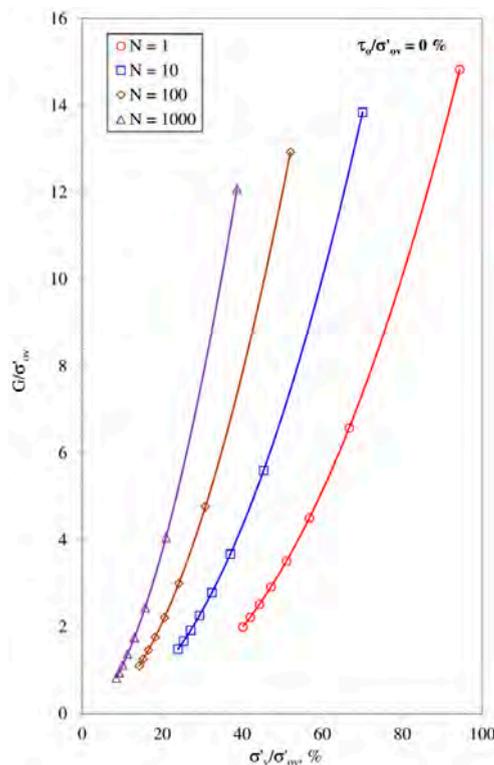


Figura 15. $\sigma'_v/\sigma'_{ov} - G/\sigma'_{ov}$ para diferentes valores de N iguales a 1, 10, 100 y 1000.

Las tendencias de variación en los espacios ortogonales $(G/\sigma'_{ov} - \gamma_c)$, $(\sigma'_v/\sigma'_{ov} - \gamma_c)$ y $(G/\sigma'_{ov} - \sigma'_v/\sigma'_{ov})$ dan origen, para cada τ_0/σ'_{ov} , a las curvas indicadas con las

letras A, B, C y D en el espacio tridimensional $G/\sigma'_{ov} - \gamma_c - \sigma'_v/\sigma'_{ov}$ indicado en la figura 16.

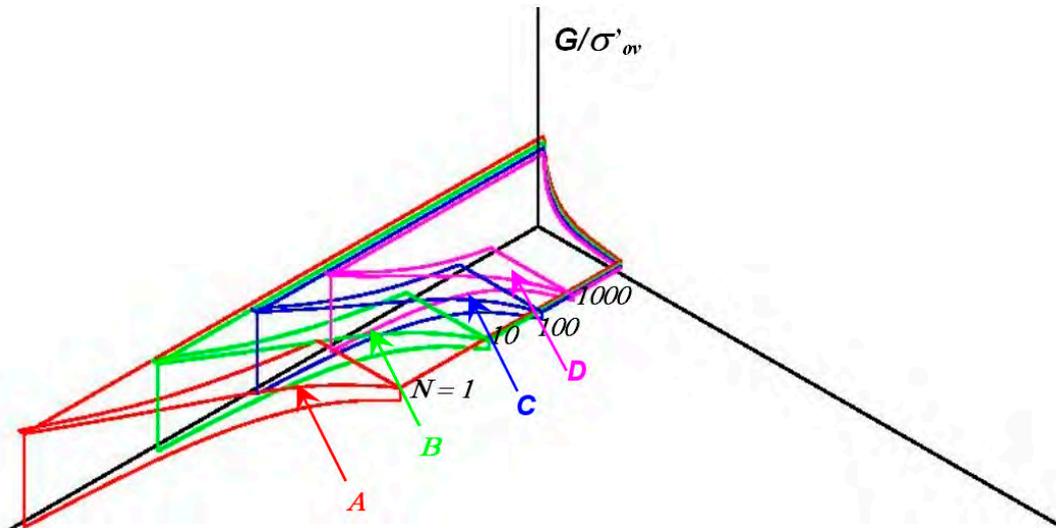


Figura 16. Representación tridimensional de $(G/\sigma'_{ov} - \gamma_c)$, $(\sigma'_v/\sigma'_{ov} - \gamma_c)$ y $(G/\sigma'_{ov} - \sigma'_v/\sigma'_{ov})$. Tendencias correspondientes a $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0$.

Si en el espacio tridimensional $(G/\sigma'_{ov} - \gamma_c - \sigma'_v/\sigma'_{ov})$ de la figura 16 se incluyen solamente las curvas A, B, C y D, sin sus proyecciones a los planos ortogonales, y además

se incluyen las curvas que identifican a las deformaciones cíclicas, se obtiene la superficie en el espacio indicada en la figura 17.

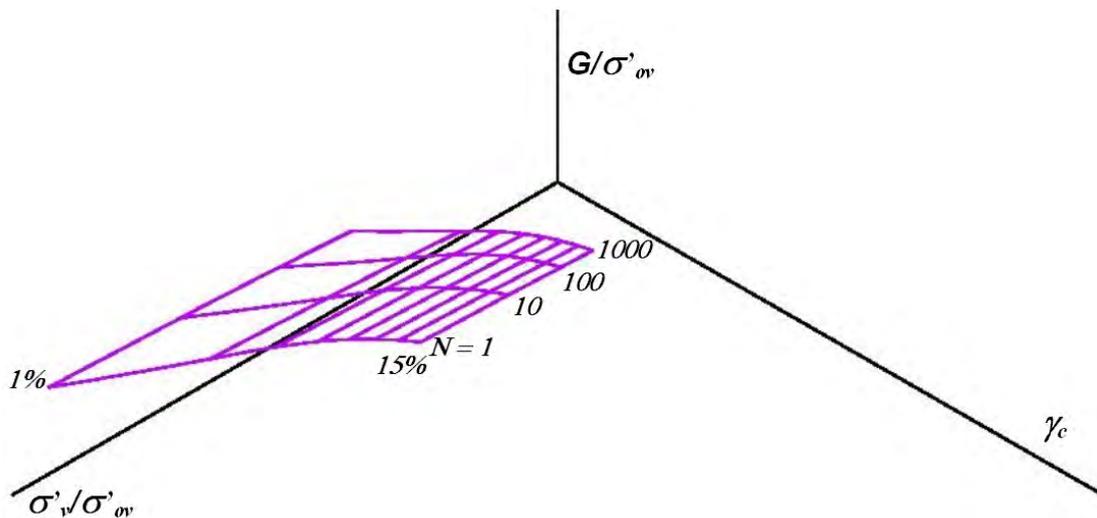


Figura 17. Representación tridimensional de la superficie en el espacio que contiene, para cada τ_0/σ'_{ov} , las posibles combinaciones entre los parámetros G , σ'_{ov} , γ_c , σ'_v y N . Superficie correspondientes a $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0$.

La información contenida en la superficie espacial indicada en la figura 17, se representa en dos dimensiones en el plano cartesiano ($G/\sigma'_{ov} - \sigma'_v/\sigma'_{ov}$) de la figura

18. Esta representación facilita la interpretación de los resultados de laboratorio incluidos en ella.

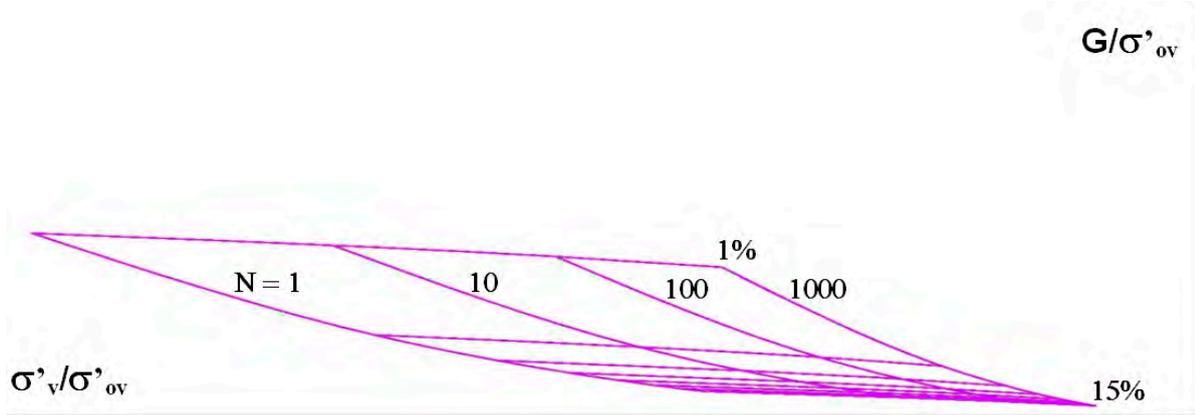


Figura 18. Representación bidimensional de la superficie que contiene, para cada τ_0/σ'_{ov} , las posibles combinaciones entre los parámetros G , σ'_{ov} , γ_c , σ'_v y N . Superficie correspondientes a $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0$.

Esfuerzo cíclico (τ_c) como una función del esfuerzo efectivo vertical (σ'_v). Al transformar el eje vertical de la figura 18 para hacer una representación en términos del

esfuerzo cíclico (τ_c) y no del módulo de rigidez al cortante y además, cambiar el sentido del eje horizontal se tienen

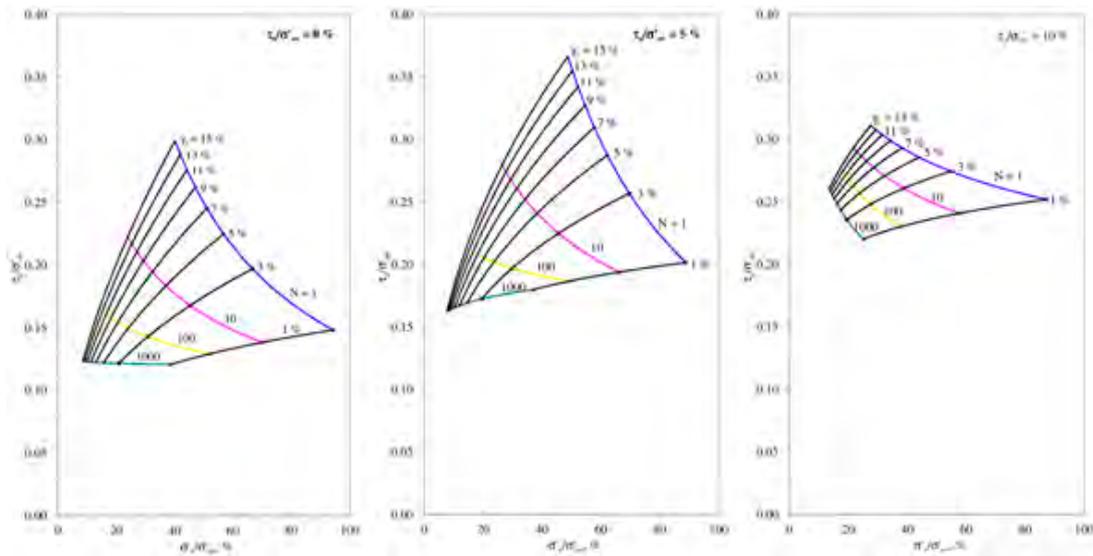


Figura 19. Gráficas que permiten evaluar el riesgo de falla súbita del depósito cohesivo en estudio. A la izquierda $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0$. Al centro $\tau_0/\sigma'_{ov} = 5\%$. A la derecha $\tau_0/\sigma'_{ov} = 10\%$.

para cada τ_0/σ'_{ov} , las gráficas de la figura 19.

Las tendencias de variación obtenidas mediante las funciones empíricas propuestas, figura 19, en términos de la presión efectiva o en términos de presión la de poros, permiten realizar el análisis descrito en los párrafos siguientes.

- En los medios granulares sueltos para que se presente el fenómeno de *licuefacción*, es necesario que la presión intersticial generada durante una sollicitación dinámica se incremente hasta reducir los esfuerzos efectivos a cero (0). En el suelo cohesivo estudiado basta con que el esfuerzo efectivo se reduzca al 20%, que el esfuerzo cíclico sea igual al 20% de la presión efectiva vertical y que el suelo sea sollicitado por 20 ciclos, para que experimente deformaciones angulares del 15% y por tanto *falla súbita* (Figura 19a, $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0$). Comparativamente, esta condición podría ser calificada como más crítica.
- Si el esfuerzo cíclico es del orden del 30% del esfuerzo efectivo vertical *In situ*, en un ciclo la presión de poros generada puede llegar a ser cercana al 60% del esfuerzo efectivo vertical *In situ*. Ello conduce a la *falla súbita*, figura 19a para $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0$.
- Para esfuerzos cíclicos menores que el 12% del esfuerzo efectivo vertical *In situ* y presiones de poros menores que el 60% del esfuerzo efectivo vertical *In situ*, el riesgo de falla bajo sollicitación dinámica es prácticamente nulo, dado que las deformaciones cíclicas serán como máximo iguales al 1%, figura 19a para $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0$.
- Con esfuerzos cíclicos relativamente bajos, del orden del 12% del esfuerzo efectivo vertical *In situ*, si la presión intersticial generada es mayor que el 60% del esfuerzo efectivo vertical *In situ*, seguramente no se presente la *falla súbita* con un número bajo de ciclos, pero el suelo sí experimentará deformaciones mayores con un número relativamente alto de ciclos, figura. 29a para $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0$.

El análisis anterior es válido para la condición particular en la que $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0$. Para los casos en los que $\tau_0/\sigma'_{ov} = 5\%$

y $\tau_0/\sigma'_{ov} = 10\%$, las tendencias de variación se conservan pero los valores que definen los rangos se modifican. A continuación se hace una evaluación comparativa en función de τ_0/σ'_{ov} .

- Parece ser que el esfuerzo estático que se aplica previamente a la sollicitación dinámica, le genera al suelo investigado cierto grado de rigidización. Para que en el primer ciclo se presente *falla súbita*, en el caso de $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0$, se requiere que el esfuerzo cíclico sea igual a 30% de la presión efectiva vertical *In situ* y que la presión de poro generada sea del orden del 60% del esfuerzo efectivo vertical *In situ*, figura 19a. Comparativamente, en el caso de $\tau_0/\sigma'_{ov} = 5\%$, para que ocurra la misma condición de falla, el esfuerzo cíclico debe ser del orden del 38% y la presión de poros cercana al 52%, figura 19b, y finalmente, si $\tau_0/\sigma'_{ov} = 10\%$ el esfuerzo cíclico y la presión de poros deben ser del orden del 31% y el 72%, respectivamente figura 19c.
- Para que las deformaciones cíclicas sean menores que el 1%, en el caso de $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0$, se requiere que el esfuerzo cíclico sea menor del 12% del esfuerzo efectivo vertical *In situ* y que la presión de poros generada sea del orden del 60% del esfuerzo efectivo vertical *in situ*, figura 29a. Comparativamente, en el caso de $\tau_0/\sigma'_{ov} = 5$, para que ocurra la misma condición de deformación cíclica, el esfuerzo cíclico debe ser menor del 18% y la presión de poros cercana al 64%, figura 19b, y finalmente, si $\tau_0/\sigma'_{ov} = 10\%$ el esfuerzo cíclico y la presión de poros deben ser del orden del 22% y el 76%, respectivamente, figura.19c.
- A fin de visualizar y entender la influencia de la combinación de esfuerzos estáticos (τ_0) y cíclicos (τ_c), conviene fijar valores de comparación e incluso tener en cuenta los resultados de los ensayos de corte simple mono tónicos. Se fija como condición de esfuerzos la suma $\tau_0/\sigma'_{ov} + \tau_c/\sigma'_{ov} = 30\%$, que corresponde más o menos a la relación $\tau_{m,máx.}/\sigma'_{ov} \approx 30\%$ en los ensayos mono tónicos para grandes deformaciones (15%), figura 8. Como condición de presión de poros generada en la etapa de falla se fija un valor igual al 60% ($\sigma'_v/\sigma'_{ov} = 40\%$), que corresponde más o menos a la presión de poros generada durante

la etapa de falla en los ensayos mono tónicos. Se aclara que el análisis que se hace a continuación, en función de τ_0/σ'_{ov} , es válido para cualquier pareja de valores $\tau_0/\sigma'_{ov} - \sigma'v/\sigma'_{ov}$.

- En las condiciones $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0\%$, $\tau_0/\sigma'_{ov} + \tau_c/\sigma'_{ov} = 30\%$ y $\sigma'v/\sigma'_{ov} = 40\%$, figura 19a, el suelo experimenta una deformación cíclica del 15% en un ciclo. A iguales condiciones $\tau_0/\sigma'_{ov} + \tau_c/\sigma'_{ov} = 30\%$ y $\sigma'v/\sigma'_{ov} = 40\%$, pero con $\tau_0/\sigma'_{ov} = 5\%$, figura 19b, el suelo experimenta una deformación del 7% en siete ciclos. Manteniendo las condiciones $\tau_0/\sigma'_{ov} + \tau_c/\sigma'_{ov} = 30\%$ y $\sigma'v/\sigma'_{ov} = 40\%$, pero con $\tau_0/\sigma'_{ov} = 10\%$, figura 19c, el suelo experimenta deformaciones $< 1\%$ incluso con un número alto de ciclos.
- Parece ser que la condición $\sigma'v/\sigma'_{ov} = 40\%$ define el umbral en el que las deformaciones cíclicas se incrementan, en la medida en que $\sigma'v/\sigma'_{ov}$ se reduce, incluso para esfuerzos cíclicos bajos. En la figura 19a, para $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0\%$ se observa que para $\tau_c/\sigma'_{ov} = 12\%$ y $\sigma'v/\sigma'_{ov} > 40\%$, las deformaciones cíclicas son menores del 1%, pero si $\sigma'v/\sigma'_{ov} < 40\%$, las deformaciones cíclicas pueden llegar a ser iguales al 15%, incluso para niveles de esfuerzos cíclicos bajos ($\tau_c/\sigma'_{ov} = 12\%$). En la figura 19b, para $\tau_0/\sigma'_{ov} = 5\%$ se observa que la condición es similar a la expuesta para $\tau_0/\sigma'_{ov} = 0\%$; la única diferencia radica en que el nivel de esfuerzos cíclicos que admite el suelo para que se desarrollen grandes deformaciones es mayor ($\tau_c/\sigma'_{ov} = 17\%$).
- Para el caso de $\tau_0/\sigma'_{ov} = 10\%$, figura 19c, el umbral entre pequeñas y grandes deformaciones se sitúa en $\sigma'v/\sigma'_{ov} = 25\%$. Además, para que las deformaciones cíclicas se incrementen desde el 1% al 15% es necesario que el esfuerzo cíclico se incremente más o menos en un 5%.
- Para las combinaciones de esfuerzos τ_0/σ'_{ov} variables entre el 15% y el 25%, y $\Delta\tau_c/\sigma'_{ov}$ variables entre el 5% y el 15%, no se incluyen las tendencias de variación mostradas en la figura 19 debido a las deformaciones cíclicas que se desarrollan son muy pequeñas a pesar de que la suma de los esfuerzos estáticos más los cíclicos

tiene valores muy cercanos a los de falla, evaluados mediante ensayos mono tónicos.

Conclusiones

Las conclusiones que se incluyen en este artículo se plantean a partir de los resultados obtenidos mediante la realización pruebas de caracterización, 16 ensayos de corte simple mono tónicos y 139 ensayos de corte simple cíclicos. Todos los ensayos se realizaron con muestras obtenidas de una zona, en particular, del puerto del Barcelona; por tanto, los resultados no son representativos del comportamiento de suelos cohesivos emplazados en otros ambientes geotécnicos ni geográficos; pero la metodología si es válida para suelos cohesivos y granulares. Las principales conclusiones, extraídas del análisis de resultados, son las siguientes:

Propiedad índice

- El depósito estudiado es de origen sedimentario, normalmente consolidado o con un bajo grado de preconsolidación, constituido por pequeñas intercalaciones de limos arcillosos, arcillas limosas y algunas intercalaciones de arena fina (no estudiadas en esta investigación). Dada la ubicación de los límites de consistencia, de todas las muestras, en la carta de plasticidad; muy cerca y por encima de la línea A y con límites líquidos menores del 50%, el depósito clasifica como arcillas limosas de baja plasticidad y baja compresibilidad. De acuerdo con los resultados de los ensayos de sedimentación sería igualmente válido clasificar al depósito como limo-arcilloso.
- Dadas las características del depósito, interestratificado y laminado, no es posible establecer tendencias de variación de los límites de consistencia, de la humedad natural, de la gravedad específica y el porcentaje de finos en función de la profundidad. Los que sí es claro es que todos estos parámetros tiene valores dentro de rangos muy estrechos.

Comportamiento estático

- El comportamiento esfuerzo - deformación, evaluado mediante ensayos de corte simple mono

tónico, indica que el depósito está constituido por un material que desarrolla su máxima resistencia con deformaciones angulares muy altas. Esto conduce a utilizar con reserva los parámetros de resistencia evaluados a partir de las envolventes de resistencia obtenidas a partir de $\tau_{m,máx.}$.

- A efectos de modelización numérica, es factible la programación y la utilización de correlaciones que permiten de manera aproximada la estimación del esfuerzo tangencial desarrollado, del ángulo de fricción interna, de la cohesión aparente y de la generación de presión de poros, en función del esfuerzo efectivo vertical *in situ* y de la deformación angular.
- En todos los ensayos, la presión de poros calculada siempre fue positiva; lo cual pone en evidencia un comportamiento contractivo típico de suelos cohesivos normalmente consolidados o con un bajo grado de preconsolidación.
- La presión de poros desarrollada fue, en todos los ensayos, máximo igual al 50% de la presión efectiva vertical *in situ* y para deformaciones angulares mayores del 15%.

Comportamiento cíclico

El comportamiento dinámico de los suelos cohesivos es muy complejo; por tanto, se requiere de amplios programas de investigación experimental, en los que se tengan en cuenta el máximo número de factores que lo pueden afectar. Al menos, desde el punto de vista del estado de esfuerzos conviene no solamente tener en cuenta la variación del esfuerzo tangencial cíclico (τ_c), sino también del esfuerzo tangencial estático (τ_o) existente antes de cualquier sollicitación dinámica; en razón de que, tanto el esfuerzo estático como el cíclico de manera independiente afectan el comportamiento, pero aún más la combinación de las dos. Los aspectos más importantes que se pueden resaltar, a la luz de esta investigación, son los siguientes:

- Para valores de $\tau_o/\sigma'_{ov} \geq 15\%$ las deformaciones cíclicas son pequeñas y dominan las deformaciones permanentes.
- La literatura reporta como condición necesaria para que se presente la falla cíclica, que la suma de

la magnitud del esfuerzo estático más la magnitud del esfuerzo cíclico sea, aproximadamente, igual al esfuerzo de falla evaluado mediante ensayos mono tónicos $\tau_o/\sigma'_{ov} + \Delta\tau_c/\sigma'_{ov} \approx \tau_{m,máx.}/\sigma'_{ov}$.

En este caso en particular, cumpliendo con esa condición, no siempre se llegó a la condición de falla por carga cíclica. Se dio el caso en el que a pesar de que $\tau_o/\sigma'_{ov} + \Delta\tau_c/\sigma'_{ov} \approx \tau_{m,máx.}/\sigma'_{ov}$, las deformaciones después de 1300 ciclos apenas llegaron a ser como máximo iguales al 7%.

A partir de lo anterior, se puede aseverar que independientemente de la magnitud de τ_o/σ'_{ov} , es la magnitud de $\Delta\tau_c/\sigma'_{ov}$ la responsable de la *falla súbita*; es decir, en la que se desarrollan grandes deformaciones cíclicas y permanentes después de un reducido número de ciclos.

- La presión de poros generada durante la sollicitación cíclica controla el riesgo de *falla súbita* y el desarrollo de deformaciones permanentes. A igual sumatoria de esfuerzos $\tau_o/\sigma'_{ov} + \Delta\tau_c/\sigma'_{ov}$ el suelo experimenta *falla súbita* con esfuerzos tangenciales mono tónicos (τ_o) bajos y esfuerzos tangenciales cíclicos ($\Delta\tau_c$) altos.
- Para el suelo estudiado, basta con que las presiones efectivas ($\sigma'v$) se reduzcan a valores equivalentes al 30% de la presión efectiva vertical *in situ* (σ'_{ov}) para que se presente *falla súbita*; lo cual, es una condición muy crítica si se compara con el fenómeno de *licuefacción* que experimentan los medios granulares sueltos, solamente, cuando los esfuerzos efectivos ($\sigma'v$) se reducen prácticamente a cero.
- A efectos de modelización y para el suelo en particular estudiado existen expresiones matemáticas sencillas que, de manera aproximada, permite correlacionar G/σ'_{ov} , $\sigma'v/\sigma'_{ov}$ y γ_c entre sí y en función del número de ciclos.
- Para cada τ_o/σ'_{ov} es posible representar en un espacio tridimensional las tendencias de variación de G/σ'_{ov} , $\sigma'v/\sigma'_{ov}$ y γ_c , entre sí y en función del número de ciclos y además, encontrar una superficie en el espacio en la que se ubican las posibles combinaciones de G/σ'_{ov} , $\sigma'v/\sigma'_{ov}$, τ_c

y N. Estas posibles combinaciones proyectadas al plano $G/\sigma'_{ov} - \sigma'_v/\sigma'_{ov}$ dan origen a gráficas que permite evaluar el riesgo de *falla súbita*.

Agradecimientos

A la fundación José Entrecanales Ibarra, por la donación del equipo necesario para realizar esta investigación, principalmente por el equipo de corte simple cíclico y a Puertos del Estado de España, por el suministro de todas las muestras utilizadas para la realización de los ensayos de laboratorio.

Referencias

- Alonso, E., Gens, A., Madrid, R. (2007). *Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Madrid: The soft foundation soils of new breakwaters at the port of Barcelona.
- Andersen, K. H. (1975). *Repeated loading on clay. Summary and interpretation of test results*. Oslo, Noruega: Research Project NGI Internal Report 74037-9
- Boulanger, R., Idriss, I. (2004). *Evaluating the potencial for liquefaction or cyclic failure of silts and clay*. California: Report N° UDC/CGM-04/01 University of California.
- Boulanger, R., Idriss, I. (2007). Evaluation of Cyclic Softening in Silts and Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, Vol 133, No. 6, pp. 641 – 652.
- Boulanger, R., Idriss, I. (2006). Liquefaction Susceptibility Criteria for Silts and Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol 132, No. 11, pp 1413 – 1425.
- Bjerrum, L., Landva, A. (1966). Direct Simple-Shear Test on a Norwegian Quick Clay. *Géotechnique*, 16, N° 1, pp. 1 – 20.
- Martínez. E., Patiño, H., Galindo, R. (2017). Evaluation of the risk failure of a cohesive soil subjected to cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 92, pp 419- 432.
- Patiño, H., (2009). *Influencia de la combinación de tensiones tangenciales estáticas y cíclicas en la evaluación de parámetros dinámicos de un suelo cohesivo*. Tesis para optar por el título doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. – UPM, <http://oa.upm.es/1735/>.
- Patiño, H, Soriano, A. (2010). *Corte simple cíclico y parámetros dinámicos de suelos cohesivos*. Manizales, Colombia: XIII Congreso Colombiano de Geotecnia.
- Patiño, H., Soriano, A., González, J. (2013). *Failure of a cohesive soil subjected to combined static and cyclic loading*. Kyoto, Japón: Soils and Foundations. 53(6), pp 910 – 922.
- Seed, H. B., Chan, C. K. (1966). Clay strength under earthquake loading conditions. *ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 92 (SM2), pp 53 - 78.
- Soriano, A., Patiño, H., González, J., Valderrama, M. (2011) *Cyclic Behaviour of Saturated Sands Subject to Previous Horizontal Shear Stresses*. Proceedings of the 15th European Conference on Soil mechanics and Eeotechnical engineering. Athens, Greece. DOI: 10.3223/978-1-60750-801-4-275.

.....

Polietileno de baja densidad como alternativa para mejorar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente

Luis Coicué, Cristhian Sepúlveda, Javier García, Edwin Guerrero, Edgar Monroy, Martin Espitia
 Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia
 Bogotá D.C, Colombia

.....

Resumen

El artículo presenta los resultados experimentales de ensayar una mezcla asfáltica densa en caliente tipo MDC-19 (acorde con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías - Invías, 2013) modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). Para la evaluación del comportamiento de las mezclas asfálticas convencionales (sin aditivo) y modificadas se realizaron ensayos Marshall. Las mezclas fueron elaboradas con un cemento asfáltico (CA) producido en Colombia, tipo CA 60-70. Al CA, sin aditivo, se le practicaron ensayos de caracterización de asfaltos como penetración, punto de ablandamiento y ductilidad. La modificación de las mezclas se realizó por vía húmeda y vía seca. Las mezclas modificadas con desecho de PEBD experimentan mayor rigidez (bajo carga mono tónica y cíclica) y resistencia a la deformación permanente, en comparación con las convencionales aumentaron en un 23%. Sin embargo, la resistencia a fatiga de las mezclas convencionales disminuye cuando se adiciona PEBD al CA.

Palabras clave: Polietileno de baja densidad, PEBD, asfalto modificado, mezcla densa en caliente, propiedades mecánicas

Abstract

The article presents the results of the experimental tests of a dense hot mix type MDC-19 (according to the specifications of the National Institute of Roads - INVIAS, 2013) modified with a low-density polyethylene waste (LDPE). For the evaluation of the behavior of the conventional asphalt mixes (without additive) and modified, Marshall tests were carried out. The mixtures were made with an asphalt cement (CA) produced in Colombia type CA 60-70. Asphalt characterization tests such as penetration, softening point and ductility are performed to the CA without additive. The modification of the mixtures was carried out by wet and dry route. Modified mixtures with PEBD waste experience greater rigidity (under monotonic and cyclic loading) and resistance to permanent deformation compared to conventional ones, these increased by 23%. However, the fatigue resistance of the drugs is noticed when the LDPE is added to the CA.

Keywords: Low density polyethylene, LDPE, modified Asphalt, hot asphalt dense mix, mechanical strength

Introducción

En el campo de la ingeniería civil, en el área de diseño y pavimentación de vías se están haciendo investigaciones enfocadas en la prolongación de la vida útil del pavimento, explorando alternativas autosostenibles, que involucren el desarrollo de nuevas metodologías en la elaboración de vías, teniendo como componente principal la reutilización de materiales producto de los residuos generados por el hombre.

La modificación de asfaltos surge en la década de los 60's en Francia, Italia, Alemania y Estados Unidos, donde se hicieron investigaciones para mejorar las propiedades mecánicas del asfalto y su durabilidad. Además, para garantizar una adecuada realización de la modificación se debe presentar buena compatibilidad del asfalto con el modificador, es decir, debe ser miscible para obtener una mezcla monofásica. (Carreño y Reyes, 2015).

Dentro de este marco de búsqueda de mejores características se han aplicado múltiples materiales tales como el caucho y el polvo de llanta entre otros, que proporcionen mejores propiedades físicas y mecánicas aumentando así su eficiencia operativa. (Ramírez, 2011)

En virtud de los resultados se desarrollaron las mezclas asfálticas en tibio las cuales tenían como objetivo, la implementación de las mezclas tibias en donde su producción a bajas temperaturas de mezclado y compactación aumentaban la vida útil del pavimento, utilizando aditivos con ciertas características que favorecen su utilización en la producción de las mezclas asfálticas. (Nieves & Carreño, 2015) (Casanova & Rodríguez, 2012)

Dentro de esta perspectiva hubo quienes intervinieron la modificación del asfalto con materiales de polietileno; es así como de acuerdo con la proporción que se tenga, el polímero tendrá propiedades que responderán mejor como lo será la estabilidad de almacenamiento en caliente ya que al tener un polietileno con un bajo peso molecular y una mayor distribución de este, será un material más adecuado para su almacenaje ya que los tanques donde se guardan los asfaltos no disponen de mecanismos de homogenización continuos por tanto no será afectado y no disminuirá su desempeño al ser aplicado. (Ho, y otros, 2006)

Una manera para aumentar el buen desempeño de una mezcla asfáltica densa en caliente, es combinar un polímero con el material asfáltico aportando mejoras en las características mecánicas, que incluyen: recuperación elástica, mayor temperatura de ablandamiento, mayor viscosidad, mayor fuerza cohesiva, mayor ductilidad y rigidez; por otro lado, como asfalto o como agregado, el material plástico debe conferirle a la mezcla total un mayor rango de temperaturas de servicio, tiempo de servicio y mayor resistencia al envejecimiento. (Yildirim, 2007).

En Colombia, estudios han demostrado que a medida que se incrementa el contenido de polietileno de baja densidad (PEBD), se alteran las propiedades del ligante de la siguiente forma: se incrementa la consistencia, la temperatura de fluidez, la recuperación elástica torsional, la viscosidad cinemática y decrece la capacidad de elongación del material. (Luque y Rincón, 2011).

Por otra parte, en la construcción de pavimentos flexibles se requieren materiales que reemplacen derivados del petróleo, los cuales se deben fabricar y manipular a altas temperaturas ocasionando un consumo de energía considerable, este se ve reflejado en la combustión de hidrocarburos, emitiendo gases que contribuyen al efecto invernadero y por ende aceleran el calentamiento global. (Camargo y Suarez, 2010). Asimismo, los pavimentos flexibles se ven enfrentados a cambios extremos de temperatura entre 20 y 80°C, afectando las propiedades fundamentales del cemento asfáltico y ocasionando fallas estructurales en la capa de rodadura. Dos de estas fallas son las principales causantes de acelerar el deterioro del pavimento y por ende disminuir su vida útil. (Ocelic y Rek, 2010).

En efecto, un pavimento flexible presenta dos problemas causados por la temperatura de servicio, es decir, por la sensación térmica del pavimento a temperaturas ambientales extremas: por ejemplo hay lugares como Puerto Carreño,

donde la sensación térmica en el pavimento en el día puede llegar a 80° C y en la noche puede descender hasta los 10° C. Estos cambios abruptos de temperatura generan en la carpeta asfáltica fallas estructurales llamadas agrietamiento por contracción y ahuellamiento por dilatación. (Wahr y Montenegro, 2007).

Es así como se puede percibir claramente la importancia que tienen en el campo de la ingeniería civil, este tipo de prácticas amigables con el medio ambiente que reducen la temperatura de fabricación y colocación, y a la vez la emisión de gases efecto invernadero a la atmosfera. Además, favorecen notablemente las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica, partiendo de que esta es una parte fundamental de un pavimento flexible debido a que debe soportar gradientes de temperatura altos (>30°C) y las cargas monotónica directamente. (Rojas y Mendivelso, 2015).

Aunado a esto, se incentiva el reciclaje de desechos plásticos, teniendo en cuenta que en Bogotá D.C. diariamente se producen alrededor de 600 toneladas de basuras de las cuales el 10% aproximadamente son plásticos y el consumo per cápita de estos materiales en Colombia es de 11.3 kg anuales. De este 10% gran parte proviene de desechos de PEBD el cual puede ser utilizado para modificar las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas y así disminuir el impacto ambiental negativo que generan. (Rondón, 2010).

Por otra parte, los beneficios obtenidos a nivel estructural son relevantes debido a que la modificación de una mezcla asfáltica densa en caliente, no solo disminuye el consumo de energía si no que mejora propiedades mecánicas como la susceptibilidad térmica; aumenta el punto de ablandamiento, disminuyendo la deformación permanente hasta en un 40% y aumenta la resistencia a la fatiga hasta en un 32%. (Rondón y Fernández, 2010).

Con base en lo anterior, este trabajo se permite evaluar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente tipo MDC-19, modificada con un desecho de polietileno de baja densidad presentado como trozos de bolsas plásticas, el cual se agregará por vía húmeda y por vía seca, con el fin de analizar su estabilidad y fluidez por medio del ensayo Marshall (de acuerdo a la normatividad del Instituto Nacional de Vías, INVIAS), determinando así, posibles variaciones en las fallas estructurales causadas por la susceptibilidad térmica (ahuellamiento y agrietamiento). A continuación, se presenta la metodología utilizada para agregar el modificador a la mezcla asfáltica, la metodología, resultados obtenidos y las conclusiones y observaciones pertinentes de la investigación.

Metodología

Para obtener un análisis comparativo de las propiedades mecánicas y mitigaciones ambientales de una mezcla MDC-19, modificada con PEBD, contra una mezcla convencional, se establece un punto de partida del tema, con base en investigaciones dirigidas hacia la modificación de asfaltos con polietileno de baja densidad. Así se inicia con una perspectiva de resultados ya evaluados y concluidos, como precedente, lo que permite tener una visión clara de lo que ya se ha expuesto en este tema.

Al iniciar con el proceso de diseño de mezcla se debe realizar previamente ensayos para la caracterización del material a emplear, por tanto, se siguen las especificaciones de Invías con los siguientes ensayos:

Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (INV. E-213), peso específico y absorción de agregados finos (INV. E-222), peso específico y absorción de agregados gruesos (INV. E-223), partículas fracturadas (INV. E-227), ensayo para medir el equivalente de arena (INV. E-133), índice de alargamiento aplanamiento (INV. E-230), pérdida en ensayo de solidez utilizando sulfato de magnesio (INV.

E-220), Micro Deval (INV. E-238) y 10% de finos (INV. E-224). Los resultados de estos ensayos se presentan en la tabla 1 y se observa que los valores cumplen con los requisitos mínimos de calidad exigidos por las especificaciones Invías (2013) para fabricar mezclas tipo MDC-19 para capas de rodadura.

Tabla 1. Caracterización de los agregados

Característica	Valor
Peso específico [-]	2,73
Equivalente de arena [%]	87
Caras fracturadas [%]	91
Índice de alargamiento [%]	6
Índice de aplanamiento [%]	9
Desgaste Micro Deval [%]	23,9
Resistencia al desgaste máquina de los ángeles [%]	22,7

Fuente: ¿?

Del mismo modo, al cemento asfáltico (60-70) se le realizan los ensayos típicos que exige la especificación INVIAS (ver tabla 2): penetración (INV. E-706), viscosidad absoluta (INV. E-715), ductilidad (INV. E-702),

solubilidad en tricloroetileno (INV. E-713), contenido de agua (INV. E-704), punto de ablandamiento (anillo y bola) (INV. E-712) y ensayo de película delgada en horno rotatorio (RTFOT) (INV. E-720).

Tabla 2. Caracterización del cemento asfáltico

Característica	Valor
Ductilidad de materiales asfálticos 50 mm/min [min]	120
Punto de ignición y de llama mediante copa Cleveland [°C]	310
Punto de ablandamiento de anillo y bola [°C]	43,5
Índice de penetración 25 °C, 100 g, 5 s [0.1 mm]	61
Gravedad específica de materiales asfálticos [-]	1,02

Fuente: ¿?

Dependiendo del proyecto, según la zona de aplicación de la mezcla, los cementos asfálticos que normalmente se emplean en Colombia son del tipo C.A. 40/50, C.A. 60/80 y C.A. 80/100. El asfalto 60/70 es un cemento asfáltico normalizado término que hace referencia al proceso industrial al cual se somete el ligante proveniente de la

refinería, para lograr cumplimiento de especificaciones y obtener una característica de penetración comprendida entre 60 y 70 mm/10. La temperatura de compactación está comprendida entre los 132°C y 137°C y su temperatura de fabricación entre 145°C y 150°C.

Por lo tanto, para esta investigación se utilizará cemento asfáltico 60/70 debido a que se adapta a las condiciones climáticas y del tránsito de Colombia, con temperaturas de servicio de entre 15°C y 25°C. La temperatura media anual en Colombia es 24,5 ° C.

Inicialmente, se realiza el ensayo Marshall sobre la mezcla convencional MDC-19 empleando porcentajes de

asfalto de 4,5; 5,0; 5,5 y 6,0%, con el fin de realizar el diseño Marshall que determina el contenido óptimo de asfalto (ver tabla 3). El ensayo que se realiza a la mezcla asfáltica, es el de resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall (INV. E - 748).

Tabla 3. Ensayo Marshall mezcla convencional

CA [%]	Estabilidad [N]	Flujo [mm]	E/F [kN/mm]	Densidad Bulk [gr/cm ³]
4,5	12357	3,76	3,2872	2,203
5,0	13366	3,91	3,4170	2,238
5,5	14128	4,09	3,4548	2,287
6,0	12679	4,29	2,9537	2,285

Fuente: ¿?

Para el análisis y comparación de la modificación de asfalto es necesario la fabricación de 10 briquetas, para cada una de las dosificaciones del polietileno de baja densidad, estas relaciones en peso serán en PEBD/CA 0,5%; 1,0% 1,5% y 2,0%. El tipo de polietileno (densidad 0,92 gr/cm³) será un residuo plástico (bolsas plásticas trituradas) generado por los desechos per cápita, estos obtenidos producto del reciclaje (ver figura 1). Estos

trozos deberán pasar el tamiz N°4 y quedar retenidos en el tamiz N°10.

Durante el proceso de diseño, para ocasionar el desarrollo de la resistencia de la mezcla asfáltica modificada, se genera en el cemento asfáltico una temperatura de 145 + -5°C, posterior a esto se agrega el polímero a la mezcla por vía húmeda.



Figura 1. Bolsas plásticas de PEBD

Los resultados de este método se pueden observar en la tabla 4. También se realizará por vía seca, como se hace usualmente, que se integra el polímero a la mezcla previo calentamiento. Los resultados de este método están en la

tabla 5, de esta manera se obtiene la mezcla modificada y se determinan las alteraciones que se producen en comparación con la mezcla convencional en cuanto a factores de estabilidad y fluidez.

Tabla 4. Ensayo Marshall por vía húmeda

PEBD [%]	Estabilidad [N]	Flujo [mm]	E/F [kN/mm]	Densidad [gr/cm ³]
0,0	13366	3,91	3,4170	2,238
0,5	15024	3,91	3,8410	2,229
1,0	15391	4,17	3,6947	2,163
1,5	15022	4,67	3,2143	2,144
2,0	11709	5,94	1,9700	2,113

Fuente. ¿?

Tabla 5. Ensayo Marshall por vía seca

PEBD [%]	Estabilidad [N]	Flujo [mm]	E/F [kN/mm]	Densidad [gr/cm3]
0,0	13366	3,91	3,4170	2,238
0,5	16255	4,47	3,6361	2,251
1,0	18833	4,55	4,1422	2,226
1,5	20075	5,38	3,7281	2,218
2,0	17645	5,94	2,9687	2,182

Fuente: ¿?

Resultados y análisis

Porcentaje óptimo de asfalto convencional

Como se observa en la figura 2, porcentaje de asfalto convencional vs estabilidad (véase figura 2) y la figura 3,

porcentaje de asfalto vs estabilidad/flujo (véase figura 3) se percibe claramente que el porcentaje óptimo de asfalto se manifiesta al 5,0%, debido a que los picos de las gráficas mencionadas están cerca del 5,0% de cemento asfáltico presente en la mezcla.

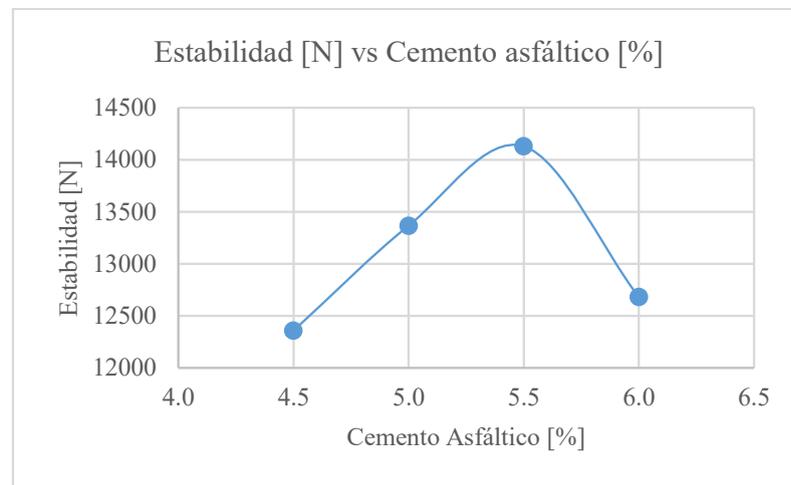


Figura 2. Estabilidad [N] vs Cemento asfáltico [%]

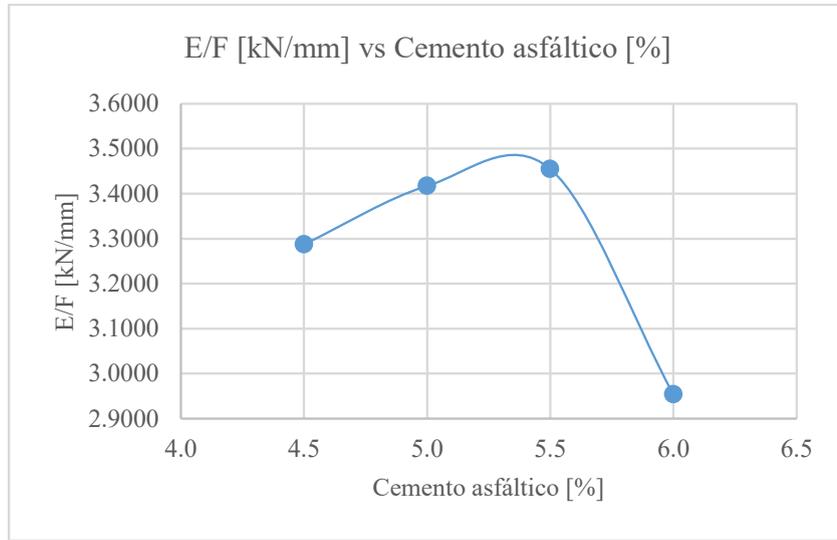


Figura 3. E/F [kN/mm] vs Cemento asfáltico [%]

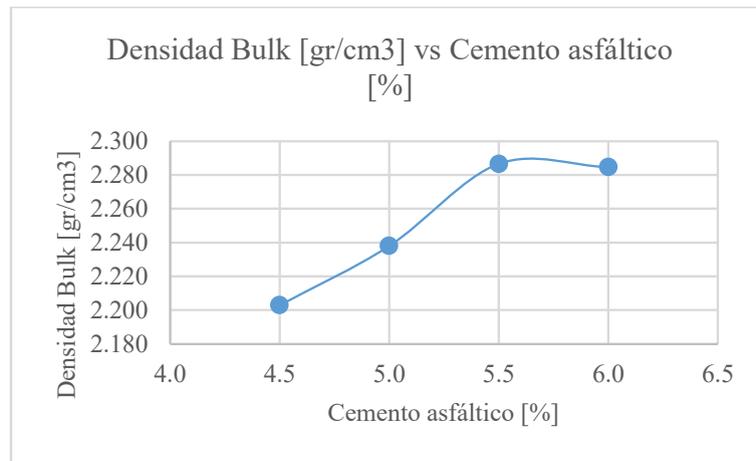


Figura 4. Densidad Bulk [gr/cm³] vs Cemento asfáltico [%]

A su vez, el pico de la figura 9, porcentaje de asfalto convencional vs densidad Bulk (véase figura 9) se sitúa entre el 5,5% y el 6,0%, sin embargo, esta información no es suficiente para establecer el porcentaje óptimo entre

estos dos valores. Por tal motivo el criterio de selección se fundamenta en la estabilidad de la mezcla que arroja un valor aproximado de la resistencia ante las cargas que deberá soportar el pavimento.

Diseño de Asfalto modificado por vía húmeda

En el diseño del asfalto modificado por vía húmeda se encuentra que el valor máximo de estabilidad se encuentra

cercano a la dosificación PEBD/CA de 1,0%, con un valor de 15391 N (ver figura 5).

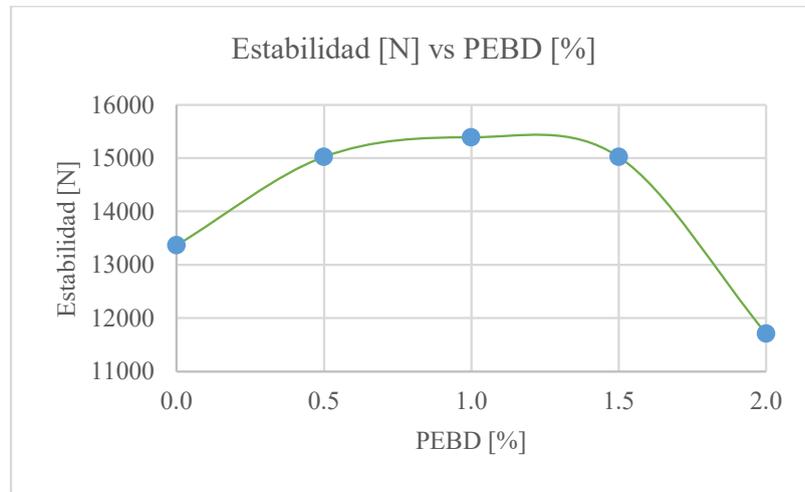


Figura 5. Estabilidad [N] vs Porcentaje de polietileno de baja densidad [%]

También se observa que al 1.0% de PEBD el flujo tiene un valor de 4,17 mm (ver figura 6), sin embargo, el porcentaje óptimo de PEBD por vía húmeda se establece en 0,5% debido a que la relación estabilidad/flujo que presenta

mejor comportamiento está cercana al 0,5 % (Ver figura 7). Además, podemos observar que la máxima densidad se alcanza con un porcentaje de 0,5% (Ver figura 8)

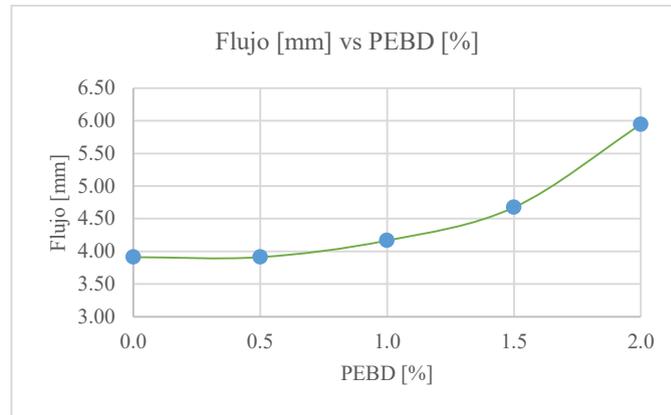


Figura 6. Flujo [mm] vs Porcentaje de Polietileno de baja densidad [%]

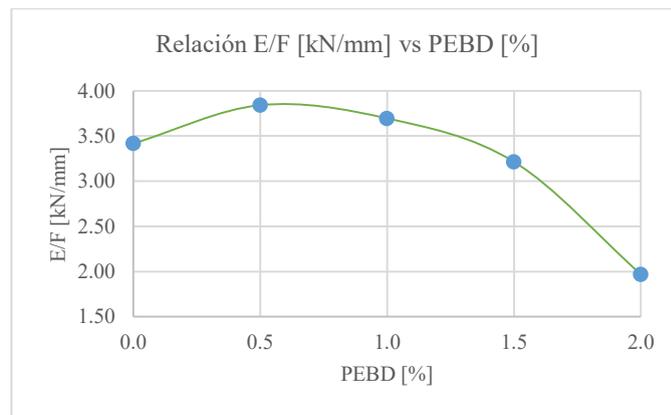


Figura 7. Relación E/F [kN/mm] vs PEBD [%]

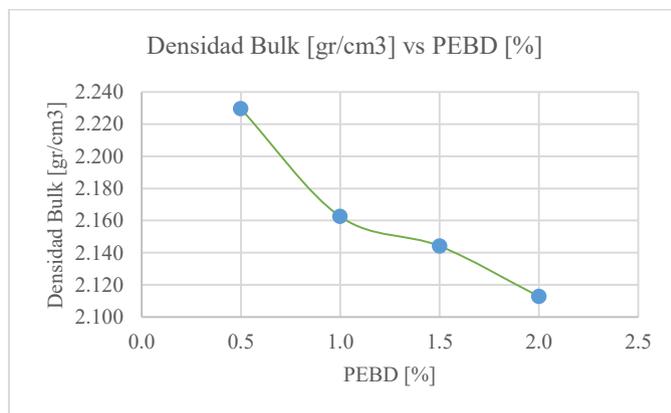


Figura 8. Densidad Bulk [gr/cm³] vs PEBD [%]

Diseño de asfalto modificado por vía seca

En el diseño del asfalto modificado por vía seca se encuentra que el valor máximo de estabilidad se encuentra

cercano al 1,5% de PEBD, presente en la mezcla asfáltica con un valor de 20075 N (ver figura 9).

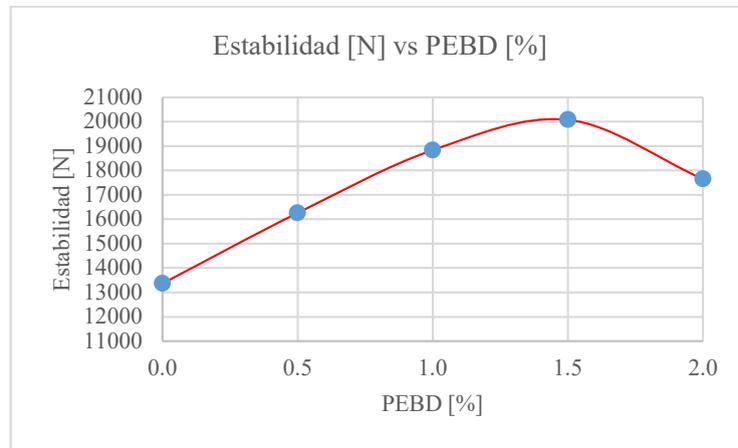


Figura 9. Estabilidad [N] vs PEBD [%]

También se distingue que al 1,0% de PEBD el flujo presenta valores por encima de 4,5 mm (ver figura 10), teniendo como consecuencia en la relación de estabilidad/

flujo presente mejor comportamiento al 1,0% de PEBD (ver figura 11).

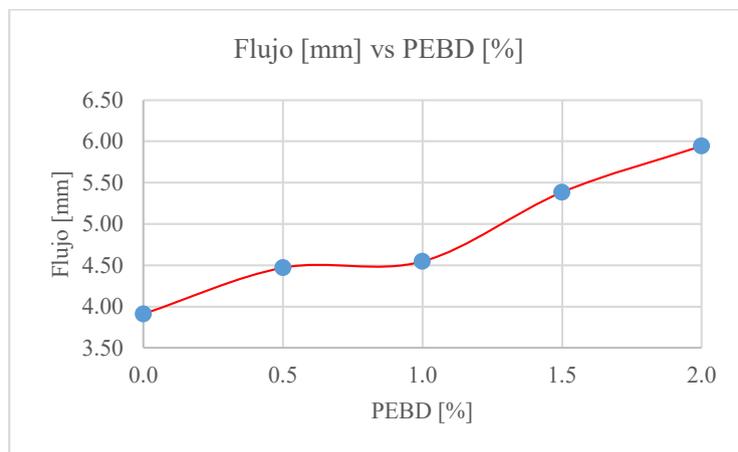


Figura 10. Porcentaje de PEBD [%] vs Flujo [mm]

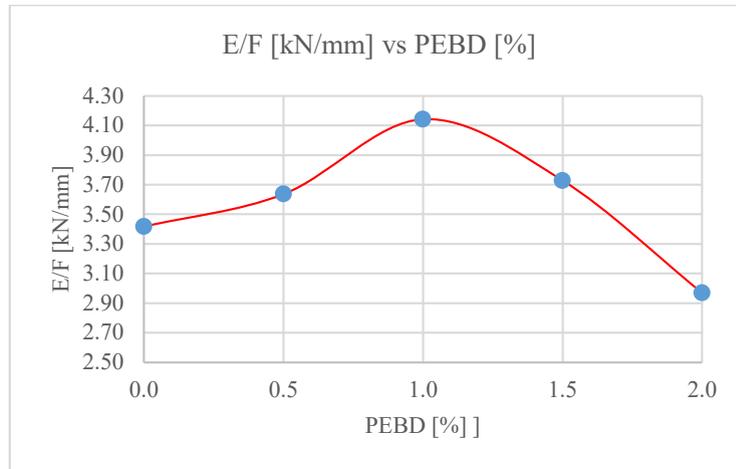


Figura 11. Porcentaje de PEBD [%] vs E/F [kg/mm]

Comparación asfalto modificado por vía seca y asfalto modificado por vía húmeda

Es importante resaltar que la estabilidad, flujo y relación estabilidad/flujo presentan mejor comportamiento

asumiendo que el pavimento podrá resistir cargas, sin presentarse deformaciones excesivas (ver figura 12).

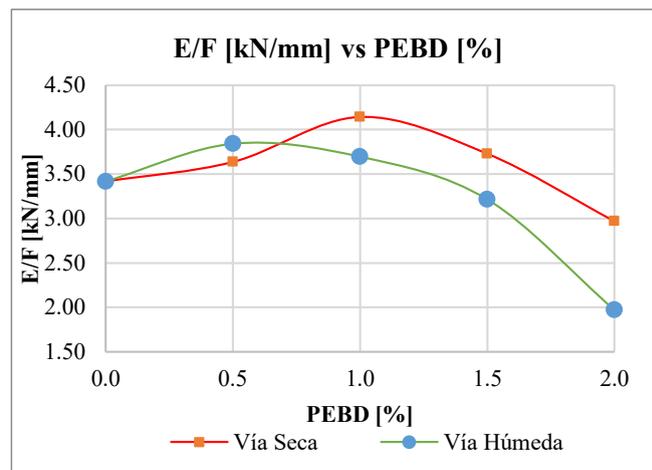


Figura 12. Porcentaje de PEBD [%] vs E/F [kg/mm] Vía húmeda y seca

Por otra parte, como podemos observar que el comportamiento de la mezcla mediante método modificado por vía seca es mayor que por vía húmeda, lo

cual nos permite inferir una mayor resistencia ante cargas de tránsito (ver figura 13).

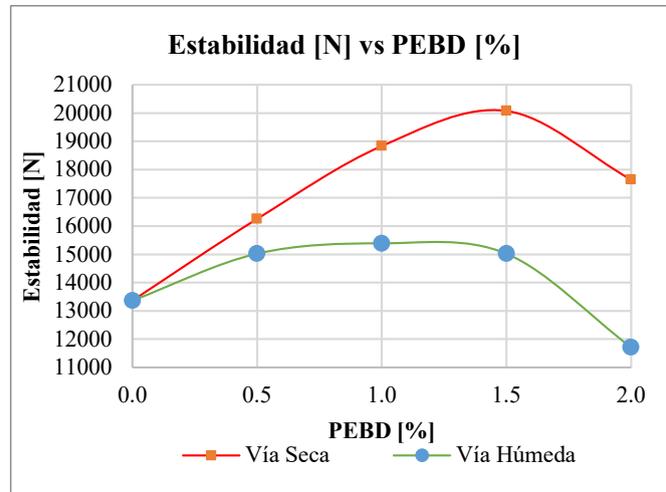


Figura 13. Estabilidad [N] vs PEBD [%]

Conclusiones

Se concluye que el método ideal para mezclar el modificador (trozos de bolsas plásticas) es el de post mezclado (vía seca), debido a que en los análisis se evidenció que todas sus propiedades variaron positivamente, por el método de vía húmeda (pre mezclado). Esto ocurre debido a que el polietileno de baja densidad presuntamente pierde propiedades al mezclarse previamente con el cemento asfáltico, causando pérdida de adherencia en el mezclado con los agregados pétreos.

Además, al adicionar el polietileno de baja densidad por vía seca (modificador como parte de los agregados), permite que el PEBD se adhiera simultáneamente al calentamiento del cemento asfáltico. Esto se comprueba debido a que la relación de vacíos no varía significativamente, pero su resistencia aumenta y la deformación disminuye lo que provoca en la carpeta asfáltica aumento en la rigidez, sin disminuir su resistencia.

La medida bajo la cual fallaron las briquetas modificadas con polietileno se ve mejorada con la adición de este

aditivo (PEBD), demostrando así en la mezcla mejor desempeño, incluso superando el valor de estabilidad establecido por Invías de 15,000 N como mínimo (alto modulo) para tener un buen funcionamiento de la mezcla asfáltica, por tanto, la estabilidad de esta, es superior (20.000 N) aumentando la resistencia a las cargas que recibe el asfalto. El aumento de la estabilidad en un 33%, permite establecer mejor resistencia en el pavimento ante las cargas del tránsito que debe soportar, así mismo una reducción del 20% en posibles apariciones de grietas en la superficie de la carpeta asfáltica.

De acuerdo con el artículo 450 de la norma de Invías, en la nota 2 de la tabla 450-10; criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall, se especifica que para mezclas elaboradas con asfaltos modificados con polímeros, se podrá aceptar un valor de flujo mayor (hasta 5,0 mm). Para tal efecto, se encuentra que el valor del flujo de la mezcla asfáltica al modificarla con polietileno de baja densidad (4,55 mm) está dentro del valor máximo permitido por la norma (5 mm).

El valor en la deformación aumento en un 16% respecto a la mezcla convencional. Esto permite establecer que para que la mezcla sufra esta deformación necesita esfuerzos por encima del valor mínimo de estabilidad, pero si se encuentra sometida a esfuerzos por debajo del valor mínimo de estabilidad su deformación disminuirá proporcionalmente.

La norma Invías señala que, en cualquier caso, se deberá cumplir el requisito establecido en la respectiva columna de la tabla (450-10) para la relación Estabilidad/Flujo representado en kN/mm (3,0 a 6,0). Se concluye que este parámetro se cumple debido a que la relación E/F de la mezcla en kN/mm es de 4,13 kN/mm.

La relación de estabilidad flujo representa el grado de ductilidad y fragilidad de la mezcla, este valor se ve mejorado con la adición de 1% de polietileno de baja densidad, de tal forma que la aparición de fisuración temprana o ahuellamiento prematuro se verá menguada al situarse en un punto intermedio del rango señalado por Invías.

Cuando los valores de E/F están por encima del rango establecido por Invías, se presume que la mezcla asfáltica es susceptible a fallar porque presentará un comportamiento frágil (aparición de grietas en el pavimento); no obstante, si los valores de E/F están por debajo del rango establecido por Invías, se presume que la mezcla asfáltica es propensa a presentar deformaciones permanentes.

La falla estructural, o ahuellamiento, se mitigará debido a que la relación estabilidad permite asegurar que el pavimento será capaz de soportar cargas hasta de 20,000 N sin que se presenten deformaciones superiores a los 4,55 mm. Del mismo modo, la falla estructural agrietamiento se mitigará debido a que la mezcla asfáltica no se considera frágil al estar dentro del rango de relación E/F en (kN/mm) teniendo en cuenta que la mezcla se falló a una temperatura de 60° C.

La relación de vacíos no se alteró considerablemente al estar en 4,99%, lo que quiere decir que la modificación tuvo un efecto neutral en este parámetro de servicio del pavimento, el cual determina que la relación de vacíos está en el rango (de 4% al 6%) establecido por Invías.

La modificación de la mezcla asfáltica MDC-19 con polietileno de baja densidad, mejoró las propiedades

mecánicas en un 33% respecto a la convencional MDC-19, determinando así, que el desecho de polietileno presentado en trozos de bolsas plásticas puede ser utilizado como alternativa en la modificación de asfaltos con polímeros.

El alcance de este proyecto limita los resultados y conclusiones desde la comparación de los métodos vía húmeda y seca, hasta la variación en las propiedades mecánicas (estabilidad y flujo) de la mezcla asfáltica modificada con PEBD, teniendo en cuenta los parámetros establecidos por Invías.

Referencias bibliográficas

- Arenas, H. L. (2006). Tecnología del cemento asfáltico. *Revista de Ingeniería*. Abril 2006, 5ª. Edición. P. 281.
- Avellán, M. D. (2007). *Asfaltos modificados con polímeros*. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala, 91 p.
- Awwad, M. y Shbeeb, L. (2007). The use of polyethylene in hot asphalt mixtures. *American Journal of Applied Sciences*. Junio, Vol. 4, No. 390, p. 32.
- Bilmeyer, F. (2004). *Ciencia de los polímeros. S.A. Propiedades de los polímeros y clasificación*. Traducido por Areal Guerrero. p. 45. ISBN: 84-291-7048-0. Ciudad ¿?: Editorial Reverté
- Camargo, H. y Suárez, A. (2010). *Diagnóstico de las nuevas tecnologías empleadas para el diseño de mezclas asfálticas densas en caliente MDC-2* Monografía para optar por el título de especialista en pavimentos, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia.
- Carreño, R. y Reyes, J. (2014). *Estudio del efecto de aditivos reductores de temperaturas de trabajo, en el desempeño de mezclas bituminosas GAP-GRADED elaboradas con asfaltos modificados con grano de caucho reciclado*. Bogotá D.C: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. p. 44.
- Colombia, Instituto Nacional de Vías. (2012). *Especificaciones técnicas y criterios de evaluación del*

- ensayo Marshall*, Bogotá D.C: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS.
- Cuadri, C. y Roman, M. García-Morales, F. Guisado, E. Moreno, P. P. (2016). Formulation and processing of recycled low-density polyethylene modified bitumen emulsions for reduced-temperature asphalt technologies. *Chemical Engineering Science*.p. 34.
- Kwang, W. Kim, Seung, K., Young, S., y Tae-Soon, P. (2011). Fracture toughness of polymer-modified asphalt concrete at low temperatures. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, Diciembre, Vol. 11 No. 06. P. 43.
- Luque, H. y Rincón, A. J. (2013). *Evaluación de las propiedades físicas de un cemento asfáltico 60/70 modificado con residuos de la fabricación de productos con polietileno de baja densidad*. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. Facultad de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia, p.23.
- Metaute, D. M. y Casas, D. M. (2009). *Desarrollo de una mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos*. Proyecto de grado para aspirar al título de ingeniero de procesos. Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Ocelic, V. y Rek, V. (2013). *Polymer modified bitumen Materials*. Tesis para optar por el título de ingeniero civil. Facultad de ingeniería química y tecnología. Universidad de Zagreb. Croacia. República de Croacia. 3 p.
- Papagiannakis, A.T. y Masad, E.A. (2017). *Pavement design and materials*. (2 ed). Texas, Estados Unidos: John Wilwy & Sons, 11 p. ISBN 978-0-471-21461-8.
- Rojas, C. y Mendivelso, K. (2014). *Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente tipo MDC-10 modificada con un desecho de polietileno de baja densidad*. Trabajo de grado para optar por el título de especialista en pavimentos, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., Colombia, p.16.
- Rondón, H. A. y Reyes, F. A. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. Bogotá DC: ECOE Ediciones. p. 34-37. ISBN 978-958-771-175-2
- Rondón, H., Fernández, W. y Castro, W. (2010). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). *Revista Ingeniería de Construcción*. Abril, Vol. 06.
- Salinas, P. I. (2009). *Aplicación de micropavimento usando asfalto modificado con polímero en la vía Sullana-Aguas Verdes*. Tesis para optar por el título de ingeniero civil. Facultad de ingeniería. Universidad de Piura, Piura, Perú, p. 36.
- Sanchez, F. (1977). *Ingeniería de pavimentos en vías terrestres*, (2 edición). Vol. 2. Bogotá, Colombia: Editorial Limusa. P. 9. ISBN: 5675-909884-0098.
- Talavera, R., Castaño, V. M., Martínez, M., Hernández, G. (2001). Desarrollo de aditivos para asfaltos modificados con bajos contenidos de hule. *Publicación técnica* No. 160. ISSN 0188-7297. México.
- Wahr, C. y Montenegro, C. (2006) *Comparación de diseños de pavimentos flexibles nuevos según el método de diseño AASHTO 93, la Normativa Chilena vigente y la guía de diseño de pavimentos empírico-mecánica*. Valparaíso, Chile: Pavimentos flexibles. p. 58.
- Yildirim, Y. (2005). Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*. Agosto. No. 21, pp. 328 – 337.

Conexiones resistentes a momento con perfiles tubulares estructurales (pte)

Laura L. Constain M.
laura-constain@unipiloto.edu.co

Resumen

Los pórticos resistentes a momentos son un sistema muy utilizado en estructuras metálicas, la utilización de estos pórticos está basada en criterios de análisis y diseño definidos en los códigos o normas de diseño de cada país; las conexiones, consecuentemente, deben seguir los requisitos planteados en estas normas. Por lo tanto, el estudio de la conexión a momento con Perfiles Tubulares Estructurales (PTE) ha sido tema de investigaciones en los últimos años, ya que actualmente no se encuentran en los códigos. En este artículo se presentan y discuten resultados experimentales de pruebas realizadas sobre conexiones metálicas entre perfiles PTE-perfil I y la conexiones PTE-PTE, tomados de la literatura técnica disponible sobre el tema.

Palabras clave: Conexión, PTE, pórtico resistente a momento, sísmico, rigidez.

Abstract

Moment resistant frames are one of the structural systems commonly used in steel structures. The use of this type of frame is based on analysis and design criteria defined on specifications. Moreover, the analysis and design of the moment resistant connections is also defined in the specifications. Therefore, in the past years, investigations have been developed in order to study the behavior of moment resistant connections with Hollow Structural Section (HSS) sections, since they have not been included in codes and specifications. The present document, talk about some studies about HSS-I beam connections and HSS- HSS beam connections, and show some of their results.

Key words: connection, HSS, moment resistant frame, seismic, stiffness

Introducción

El estudio de las estructuras en Ingeniería ha sido desarrollado por muchos años, debido a la gran importancia que tienen en esta área científica como para la sociedad: son la unión de elementos con el fin de prestar un servicio a las personas. Las estructuras, como han sido enseñadas a los ingenieros civiles, tienen como función el albergue para el uso de las personas, como vivienda, oficinas, entre otros, por lo cual, su análisis y diseño debe tener en cuenta el estado de servicio y el estado de solicitaciones últimas, para garantizar que no fallen por cargas gravitacionales o cargas accidentales como de sismo o viento. El análisis y el diseño deben garantizar que se protege la vida humana.

A lo largo del tiempo, el estudio de las estructuras se ha separado según el material de las mismas, en donde cada material lleva diferentes tecnologías y normas para su análisis y diseño. Las estructuras metálicas son, por consecuencia, una rama muy importante de las estructuras que se ha sido estudiada durante las últimas décadas y que los ingenieros de diferentes países han tenido que investigar para conocer el comportamiento de los diferentes elementos respecto a los diferentes tipos de cargas, gravitacionales y no gravitacionales.

Para el análisis y diseño de las estructuras metálicas, se debe tener en cuenta las características del material, su geometría y la forma de construcción. Se debe estudiar el tipo de cargas, el tipo de apoyos y entender las solicitaciones que se generan en los elementos. Al tener definido el diseño de los elementos, es importante realizar el diseño de las conexiones, ya que este es el proceso donde se define como se unirán los elementos. El diseño de las conexiones debe garantizar el comportamiento local y global de la estructura, por lo tanto, es un tema que debe tener toda la atención de los diseñadores calculistas. Las conexiones son la base por la cual se puede izar una estructura metálica y son las responsables de tener un proceso constructivo óptimo para el desarrollo de una obra.

Las conexiones metálicas se deben entender como las encargadas de representar los apoyos y uniones que se previeron en el proceso de análisis y que en la realidad de la construcción, se deben respetar para garantizar el comportamiento adecuado y previsto de los elementos y así asegurar el comportamiento de la estructura en general. Estas conexiones metálicas se han estudiado, según las necesidades constructivas y los tipos de perfiles a utilizar a medida que pasa el tiempo. Razón por la cual, actualmente se tienen definidas conexiones simples y conexiones precalificadas para perfiles de sección "I" (perfiles W, IPE, HEA, entre otros). A medida que pasa el tiempo y que las estructuras metálicas van tomando más fuerza en el mercado, se ha visto el uso frecuente de perfiles tubulares. Estos perfiles tubulares estructurales (PTE) o hollow structural sections (HSS), han tenido gran acogida en el mercado debido a sus geometrías, espesores y a los diferentes usos que se les puede dar en relación con los diseños arquitectónicos y los requerimientos de salubridad, que en el caso de Colombia son establecidos por el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos, Invima, para estructuras de uso especial, como plantas de alimentos.

Las conexiones metálicas, sin importar el tipo de perfil, se pueden clasificar en conexiones soldadas, conexiones pernadas o combinadas, donde se tienen elementos pernados y otros soldados. Las conexiones, deben ser diseñadas según las solicitaciones y las capacidades de los elementos a conectar. Por lo tanto, es de gran importancia conocer la localización de las mismas y tener definido si estas conexiones son uniones simples o pertenecen a las conexiones de los elementos del Sistema de Resistencia Sísmico (SRS). La experiencia y el aprendizaje obtenido por las fallas en estructuras bajo fuerzas de sismo de gran magnitud, han llevado a investigadores por medio del American Institute of Steel Construction (AISC) [1], a definir y estandarizar conexiones metálicas, para garantizar el comportamiento y la utilización de las mismas. Las conexiones en general, se pueden diseñar según las guías de diseño del AISC [2], pero las conexiones para pórticos resistentes al momento que hacen parte del SRS deben tener un diseño especial, por lo tanto, se denominan conexiones pre-calificadas, y estas se encuentran en el AISC-358 [3]. Las conexiones pre-calificadas fueron estudiadas, analizadas y ensayadas por ingenieros especialistas en el tema, por lo que, al aplicar su uso, se tiene seguridad de su comportamiento, procedimiento de análisis y diseño.

Para el diseño de estructuras metálicas, cada país tiene su norma o código, en el caso de Colombia, se tiene *El Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10* [4], el cual es el documento principal para el análisis y diseño de estructuras. El capítulo de estructuras metálicas, o Título F, ha sido planteado y toma como referencia principal lo definido

en la AISC (2011) [1]. Por lo tanto, para las estructuras metálicas se deberán utilizar las recomendaciones dadas por la NSR-10 [4], o se pueden tomar documentos avalados por el AISC [1, 2, 3, 5]. En el caso de Colombia, las conexiones se deben analizar dependiendo del tipo y de la capacidad de disipación de energía de la estructura, lo que implica diferentes condiciones, criterios y recomendaciones, según el tipo de disipación de energía deseado.

Actualmente, los perfiles PTE son utilizados como elementos del sistema de resistencia sísmica, SRS, y por lo tanto, el análisis y diseño de conexiones con ese tipo de perfiles se hacen indispensables. Consecuentemente, se empieza a ver la necesidad de realizar más estudios y ensayos de laboratorio para poder tener un mayor conocimiento y entendimiento del comportamiento de las conexiones con perfiles PTE, ya que no hay documentos legales que tengan esta información.

En este artículo se presenta una descripción sobre los requerimientos dados por la NSR-10 [4] para el diseño de conexiones metálicas (PTE-I y PTE-PTE). Posteriormente, se discuten algunos resultados experimentales disponibles en la literatura técnica sobre conexiones resistentes a momentos con vigas de sección I y con vigas en perfiles PTE.

Requisitos de la NSR-10 [4]

Las conexiones estudiadas en este artículo corresponden a conexiones PTE-perfil I o conexiones PTE-PTE. Estas conexiones pueden ser la unión entre viga-columna o la unión o extensión de perfiles en una columna o viga. En el caso de estructuras sismo resistentes, la conexión resistente a momento, es una de las conexiones más utilizadas, por lo tanto, el emplear perfiles PTE ha generado nuevas investigaciones y se han desarrollado nuevos ensayos de laboratorio [5,6]. Estos ensayos tienen como objeto estudiar el comportamiento de la conexión, definir las características y propiedades, para tener un entendimiento de la rigidez que se le puede aportar a la estructura y determinar la capacidad de la misma.

En el caso de la utilización de perfiles PTE en pórticos resistentes a momento para estructuras sismo resistentes, se deben tener en cuenta ciertos criterios, los cuales, para Colombia, están definidos en la NSR-10 [1], Título F3 y los cuales se describen a continuación como referencia.

Los PTE deben cumplir con unas especificaciones respecto al material y satisfacer la norma ASTM A500 (Grado B o C) [6] o la ASTM A 501 [7]. De igual forma, están definidos los valores de R_y y R_t , para determinar las resistencias esperadas del elemento según el tipo de material, tal como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de R_y y R_t para aceros (Tabla f.3.1.4-1 [4])

Tabla F.3.1.4-1
Valores de R_y y R_t para aceros y concreto

Aplicación	R_y	R_t
Secciones laminadas en caliente en barras:		
• ASTM A36/A36M	1.5	1.2
• ASTM A1043/A1043M Grado 36	1.3	1.1
• ASTM A572/572M Grado 50 o 55,	1.1	1.1
• ASTM A913/A913M Grado 50, 60 o 65	1.1	1.1
• ASTM A588/A588M,	1.1	1.1
• ASTM A992/A992M, A1011 HSLAS Grado 55	1.1	1.1
• ASTM A1043/A1043M Grado 50	1.2	1.1
• ASTM A529 Grado 50	1.2	1.2
• ASTM A529 Grado 55	1.1	1.2
Perfiles tubulares estructurales (PTE):		
• ASTM A500 (Grado B o C), ASTM A 501	1.4	1.3
Tubería de acero:		
• ASTM A53/A53M	1.6	1.2

Los elementos y en este caso, los perfiles PTE, se deben clasificar por ductilidad, la cual se define según las relaciones ancho espesor: “b/t” y “h/t”; en donde b es el ancho de la aleta, h es la altura del alma y t es el espesor de la aleta o del alma, respectivamente. Debido a que los perfiles PTE son cerrados, es importante tener claridad la orientación del perfil, para saber cuándo se utiliza el criterio b/t o h/t, véase la figura 1. Esta clasificación por ductilidad es definida según los rangos de miembros de ductilidad alta, λ_{da} y miembros de ductilidad moderada, λ_{dm} , donde para la relación b/t se tiene que:

$$\lambda_{da} = 0.55 * \sqrt{\frac{E}{F_y}}, \lambda_{dm} = 0.64 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (1) \quad (1)$$

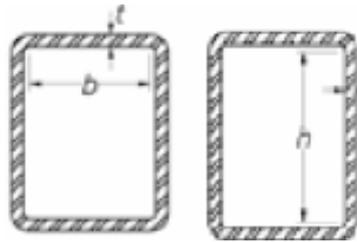


Figura 1. Definición del perfil PTE

El Título F3 [4], también especifica los requisitos mínimos para tener en cuenta en cada sistema (PRM-DMI, PRM-DMO y PRM-DES), en donde se definen los criterios para el análisis, los requisitos del sistema, los requisitos de los miembros (columna y viga) y los criterios a tener en cuenta para las conexiones de los mismos.

Como requisito y criterio para el diseño de la conexión viga – columna, se espera que la conexión resistente a momento deba ser capaz de cumplir con un ángulo de deriva de piso, o ángulo de rotación y tener una capacidad o resistencia a flexión definida como un porcentaje del momento plástico (M_p) de la viga conectada a la columna. Para satisfacer estos requisitos, se tiene un procedimiento de validación, el cual define las condiciones, y el cuales está descrito en el numeral F3.11 de la NSR-10 [4].

En Colombia, como en muchas partes del mundo, para evitar el procedimiento de validación o precalificación de

Para la relación h/t, los valores se encuentran en función del coeficiente C_a , el cual es igual a $\frac{P_u}{\phi P_n}$, y se encuentra en la Tabla 1 [4].

Definir la capacidad de ductilidad de los elementos es de gran importancia para poder definir la utilización según el tipo de disipación de energía que se requiere en el sistema de pórticos resistente a momento, PRM, donde los pórticos pueden clasificarse como como de disipación de energía especial, DES, de disipación de energía moderada, DMO o de disipación mínima de energía, DMI.

una conexión, se utilizan conexiones ya precalificadas y aceptadas por el AISC [1, 3] En el caso de las conexiones con perfiles PTE, estas conexiones todavía no están incluidas en un documento del AISC, por lo cual se reitera la el tema de la generación de nuevas investigaciones en el tema.

Investigaciones de conexiones con perfiles pte

Debido a la importancia de estudiar conexiones con perfiles tubulares estructurales PTE, se han generado diferentes tipos de estudios y varios tipos de conexiones. Según lo estudiado en diferentes artículos, las últimas investigaciones han estado dirigidas a conexiones viga – columna de las siguientes configuraciones:

- Columna PTE - Viga I
- Columna PTE – Viga PTE

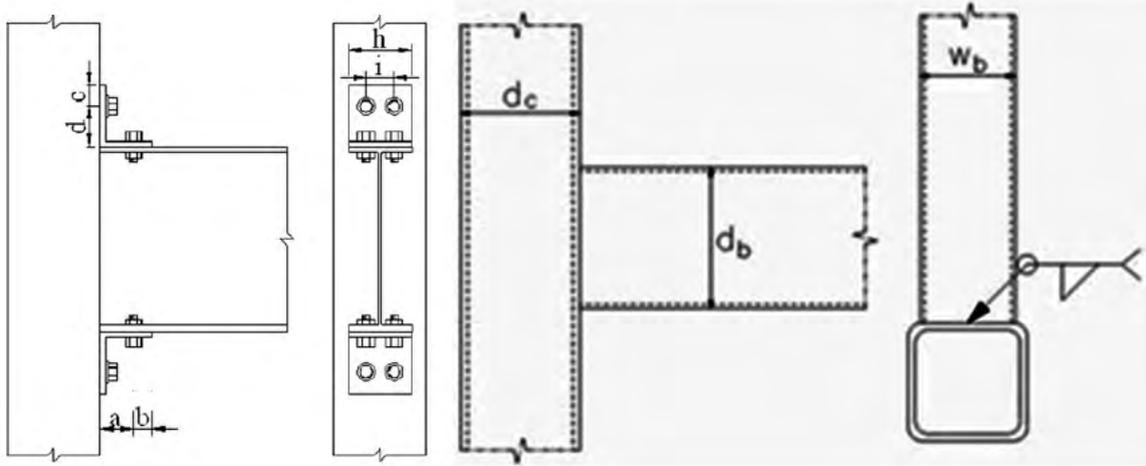


Figura 2. Esquema de configuración de un espécimen de prueba. [8]

Figura 3. Esquema de una conexión típica a momento entre perfiles PTE [9]

Donde estas dos configuraciones, se han dividido en dos tipos: conexiones pernadas y conexiones soldadas. Esto debido a la necesidad y requerimientos que se tengan en cuestión de fabricación y montaje. Sin importar la configuración o el tipo de conexión, el objetivo de la mayoría de las investigaciones, ha sido enfocado en determinar la rigidez o flexibilidad de la conexión en estudio y la capacidad o resistencia de la misma. En conjunto a los ensayos, las investigaciones incluyen modelos matemáticos en elementos finitos, realizados con el fin de poder comparar y obtener correlaciones entre la modelación y los resultados obtenidos con los diferentes especímenes de las conexiones.

A. Conexiones columna PTE - Viga I

Como parte de este estudio, se quiere incluir algunos resultados de los artículos referenciados para entender el proceso y la evolución obtenida en relación con el estudio de estas conexiones resistentes a momento. Como ejemplo, en las figuras 4 y 5, se presenta la configuración de un ensayo de una viga en "I" conectada a una columna PTE, descrita en el artículo de Qian-Yi Song et al. [19], donde se estudia una conexión con la combinación de los dos tipos de unión: pernada y soldada.

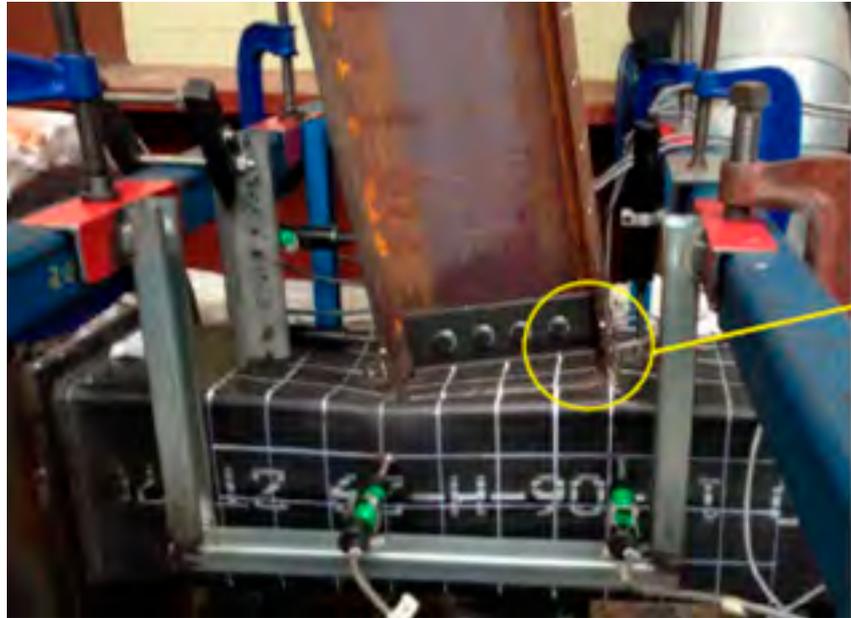


Figura 4. Deformación y falla de una conexión soldada bajo cargas monolíticas y cíclicas. [10]

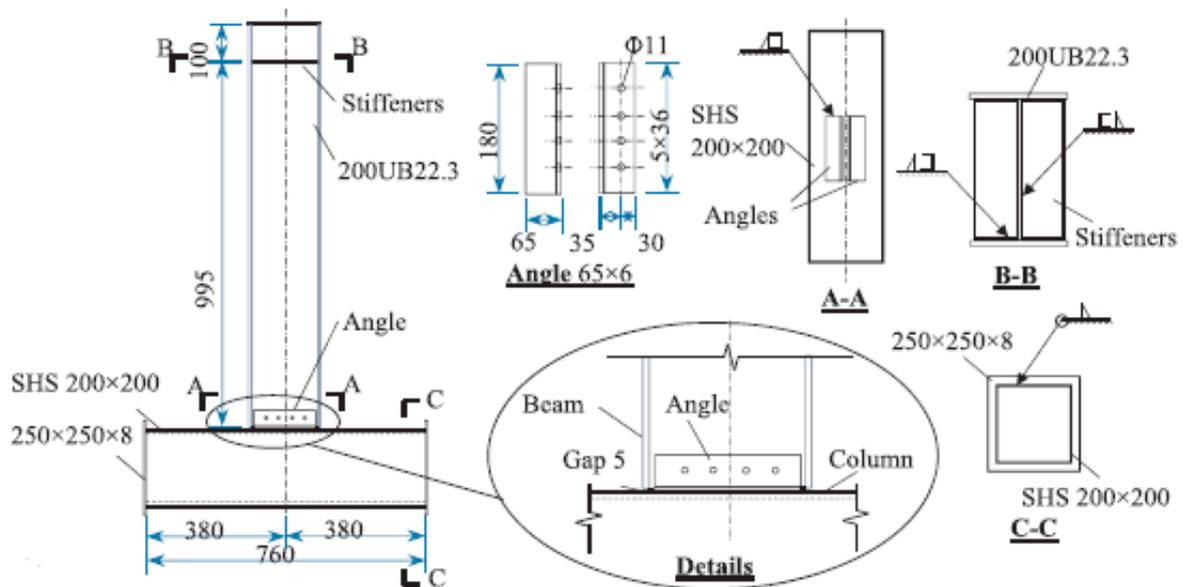


Figura 5. Configuración del detalle de la unión viga I y columna tipo PTE, para ensayo. [10]

Después de analizar los especímenes y los modelos de elementos finitos (FE), se encontró que sin importar el tipo de configuración, o el tipo de conexión, las fallas ocurrirán en el elemento crítico, el cual se define como el más débil. Para este caso, y como se puede observar en la figura 4, la falla se dio en la columna, en la zona de panel. Sin embargo, el comportamiento de la conexión fue satisfactorio en relación con la ductilidad y la capacidad de la rotación, ya que cumplió con los requerimientos del ángulo de 0,04 rad y el 0,8 Mp. Estos dos factores, son la clave en la definición del tipo de conexión como se determinó en el numeral II, ya que estos son los factores que definen si la conexión puede ser aceptada para sistemas de resistencia sísmica, según la NSR-10 [4].

Como una conclusión adicional, Qian-Yi Song et al. [19], encontró que los indicadores de daño en la conexión son: la relación cinemática de ductilidad ($\mu_{si} = \delta_i / \delta_y$) y la relación de disipación de energía definida (Dce) como:

$$D_{ce} = \sum_i^N \frac{E_i}{E_{total}} \quad (2)$$

Donde E_i es la energía disipada por un ciclo, E_{total} representa la toda la energía disipada hasta el momento de falla y N es el número de ciclos. Cabe anotar, que estas relaciones fueron determinadas experimentalmente y que, según el autor, tiene una relación directa con el comportamiento de la conexión.

Para conexiones de la misma configuración pero pernadas, se encontró que el comportamiento de la conexión está relacionado con los elementos de conexión. Uno de los casos, es descrito en el artículo de Y. Liu et al. [10], donde se describen los resultados encontrados de los ensayos realizados a conexiones pernadas bajo cargas axiales, utilizando perfiles angulares como elementos auxiliares de conexión, como se muestra en las figuras 6 y 7.

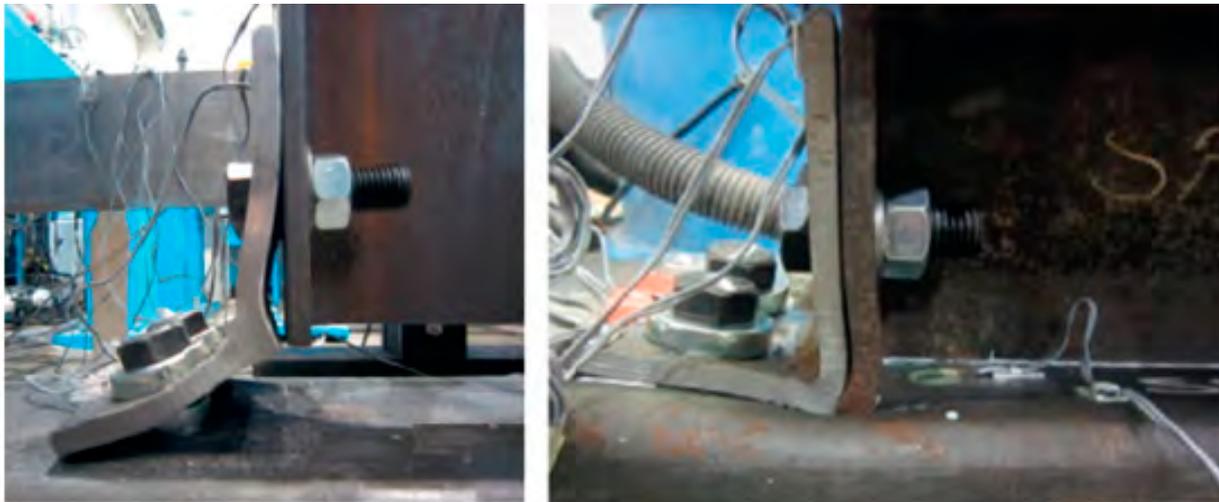


Figura 6. Deformaciones principales en conexiones bajo cargas a tensión [8]

Figura 7. Deformaciones principales en conexiones bajo cargas de compresión.[10]

El comportamiento o la falla observada en las figuras 6 y 7, están relacionadas y estudiadas en función de los espesores de cada uno de los elementos. La falla a tensión está gobernada por el espesor del ángulo, mientras que la falla de compresión está gobernada por el espesor del perfil

PTE. Este estudio, a pesar de ser bajo cargas axiales, se relaciona con las conexiones resistentes a momento, debido a que un momento se puede representar como un par de fuerzas axiales, donde se tiene un lado sometido a tensiones y el lado contrario sometido a fuerzas de compresión. Al

igual que en el artículo de Qian-Yi Song [10], se puede decir que falla el elemento más débil. Adicionalmente, se ha encontrado que el comportamiento de la conexión está en función del tipo de perno utilizado y que este juega un papel importante en el desarrollo de los ensayos y los resultados del mismo, ya que el perno es el encargado de transmitir la fuerza entre los elementos y su material, diámetro y capacidad pueden influir en la rigidez de la conexión.

El estudio de conexiones Columna PTE - Viga I, se ha desarrollado bajo diferentes tipos de conexión, pero por lo observado, la tendencia de estas conexiones es a ser conexiones pernadas; aprovechando el tener un perfil en "I", que facilita el uso de pernos en la zona de la viga o en la aleta de la viga. En estos estudios [11, 12, 13-], se ha observado que el comportamiento de la conexión está directamente relacionado con la localización de los pernos, la separación de los mismos y las láminas de conexión, factores que influyen en el comportamiento, al generarse desplazamientos y aplastamiento en los miembros de conexión.

B Conexiones columna PTE - Viga PTE

El estudio de la segunda configuración de conexión, se vuelve más complejo debido a tener dos perfiles

PTE, lo cual genera consideraciones en el armado, al ser elementos totalmente cerrados. Consecuentemente, el tener la viga con un perfil PTE, implica tener un mayor conocimiento del comportamiento de los perfiles tubulares, PTE, bajo condiciones de flexión ante cargas cíclicas. Esta necesidad, llevó a desarrollar proyectos [14] donde se estudió el comportamiento de los elementos tubulares bajo flexión, y en donde se profundizó en la importancia que hay en la relación de ductilidad, ancho- espesor (b/t y h/t), y la correlación que hay entre estas propiedades y el cumplir con los criterios de rotación de la conexión y capacidad de la misma, según el momento plástico de la viga (Según F3.5 [4], PMR-DMO: rotación de 0,02 rad y 0,8 Mp y PMR-DES: rotación de 0,04 rad y 0,8 Mp).

En la figura 8, se observa el resultado del modelo de elementos finitos con el comportamiento obtenido en los ensayos de laboratorio [14]. Se muestra la similitud en el comportamiento, donde la modelación se ajusta a los resultados del ensayo realizado a la viga HSS254x203x6,4 (mm). La curva presenta los valores de rotación del perfil; factor clave en el diseño de pórticos resistentes a momento PRM, del sistema de resistencia sísmica.

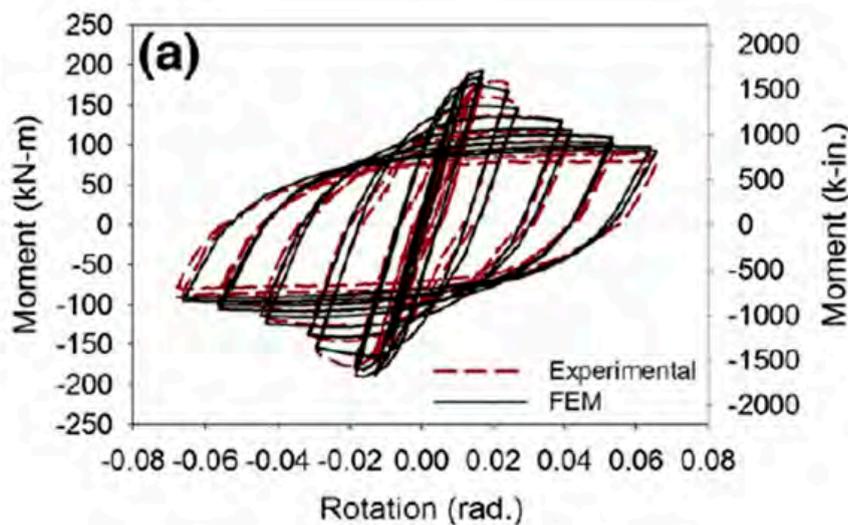


Figura 8. Curvas de histéresis del perfil HSS254x203x6,4(mm) real y con modelo de Elementos Finitos (FE) [14]

Como resultado, M. Fadden [14] presenta ecuaciones donde se relacionan los criterios de ductilidad, relación

$$Deg_{0.04} \left(\frac{b}{t} \right) = 0.012 \left(\frac{b}{t} \right) - 0.064 \rightarrow 7.0 \leq \frac{b}{t} \leq 31.5 \quad (3)$$

$$Deg_{0.04} \left(\frac{h}{t} \right) = 0.012 \left(\frac{h}{t} \right) - 0.228 \rightarrow 16.4 \leq \frac{h}{t} \leq 52.0 \quad (4)$$

Donde estas ecuaciones relacionan el ángulo de rotación en función de las relaciones de ancho espesor para conexiones con perfiles PTE [14].

$$\theta_{0.8Mp} \left(\frac{b}{t} \right) = -12.4 \times 10^{-4} \left(\frac{b}{t} \right) + 0.0068 \rightarrow 7.0 \leq \frac{b}{t} \leq 31.5 \quad (5)$$

$$7.0 \leq \frac{b}{t} \leq 31.5 \quad (5) \quad \theta_{0.8Mp} \left(\frac{h}{t} \right) = -13.6 \times 10^{-4} \left(\frac{h}{t} \right) + 0.0090 \rightarrow 16.4 \leq \frac{h}{t} \leq 52.0 \quad (6)$$

Las ecuaciones (3), (4), (5) y (6), representan la importancia que los valores de la relación ancho-espesor tienen al diseñar y esperar un comportamiento en el análisis de la conexión. La relación ancho-espesor, ha sido estudiada y relacionada a estudios por los autores J. McCormick y M. Fadden, [9, 14, 15, 16] y han podido generar correlaciones aplicables para el diseño de conexiones con los perfiles PTE.

De igual modo, teniendo conocimiento de la importancia de la relación ancho-espesor, se han realizado ensayos de

ancho- espesor, con los criterios de diseño de la conexión viga-columna, como se muestra a continuación.

Las ecuaciones, a continuación, relacionan la capacidad de rotación de un 0,8 Mpen función de las relaciones de ancho espesor para conexiones con perfiles PTE [14]

conexiones con perfiles PTE- [9, 14, 15]. Estos ensayos han sido encaminados a generar *conexiones pre-calificadas* para poder implementarlas en documentos del AISC y así tener una guía de análisis y diseño para esta configuración de conexiones. Ensayos de conexiones totalmente soldadas se han estudiado, donde se realizan comparaciones del comportamiento de conexiones reforzadas, es decir con láminas en la columna y la viga y conexiones sin reforzar, que no tienen ningún tipo de elemento adicional.

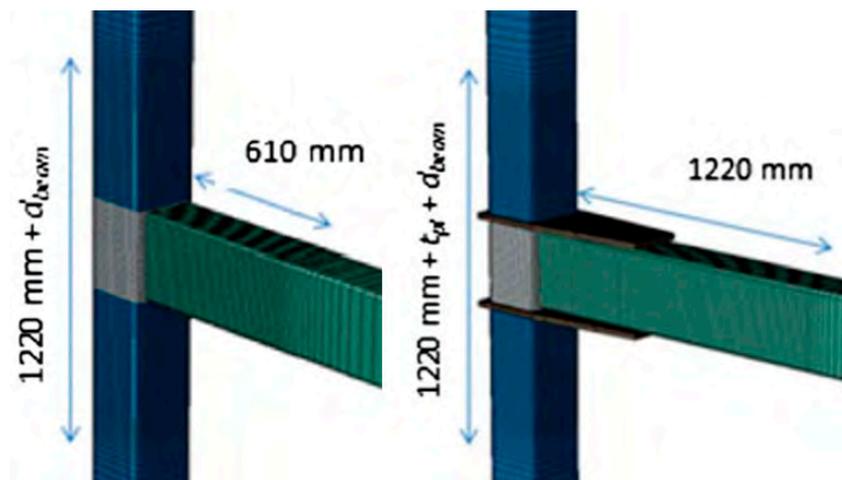


Figura 9. Modelo de elementos finitos para conexión entre columna PTE y viga PTE, sin reforzar y reforzada. [9]

Con los resultados obtenidos de estos ensayos y modelaciones, se ha podido concluir que las conexiones no reforzadas no tienen desarrollada la capacidad a momento requerida en la conexión. Conjuntamente, se observó que estas conexiones dependen de la relación “ β ”, la cual es la relación ancho viga con ancho columna y la relación de espesores de la viga y la columna (t_b/t_c). En cambio, las conexiones reforzadas desarrollan la articulación plástica en la viga, como se espera, sin importar los valores de “ β ”. Adicionalmente, se pudo observar que las láminas de refuerzo incrementan la capacidad de la conexión, debido a que mejoran el comportamiento a flexión de la unión, generando que los criterios de diseño de las conexiones se cumplan. Las conexiones reforzadas presentan una mayor rigidez, lo cual implica un comportamiento mejor para las condiciones de servicio como lo es la verificación de los criterios de deriva.

El comportamiento y los resultados obtenidos, se pueden relacionar con los requisitos definidos en la NSR-

10 [4], para pórticos resistentes a momento, donde la unión soldada sin reforzar, podría aplicarse para un sistema PRM-DMI, y una unión soldada reforzada, aplicaría para los requisitos de los PRM-DMO y PRM-DES [15]

Cabe anotar, que por cuestiones constructivas, tener conexiones pernadas puede ser de gran utilidad para mejorar las condiciones de montaje y disminuir los tiempos de armado. Sin embargo, como ya se había anotado, el ser un perfil cerrado, genera complicaciones en la utilización de los pernos. Para esto, lo más conveniente, es utilizar pernos pasantes, condición que genera esfuerzos puntuales y distorsiones en las paredes de los perfiles PTE. Esta distorsión afecta el comportamiento del perfil y en consecuencia no se llegaría a cumplir los criterios para el diseño de las uniones viga-columna, véase figura 10. De ahí, la necesidad de reforzar la zona de conexión del perno, para poder imprimirle mayor capacidad a la unión y evitar fallas locales que generen o desaten un comportamiento no deseado en las conexiones.

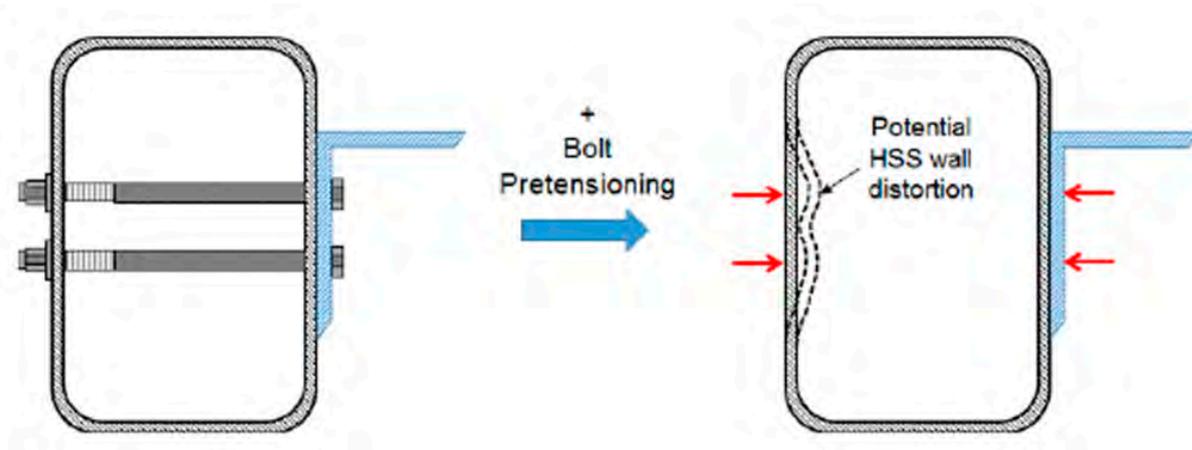


Figura 10. Esquema de la posible distorsión en la cara de un perfil PTE, bajo los efectos del pretensionamiento de pernos. [7]

El reforzamiento del perfil PTE en la zona de pernos, puede ser por medio de láminas, ángulos o canales, con el fin de darle a los puntos donde se realice la perforación, un mayor espesor que a su vez le proporcione mayor rigidez a la pared del perfil tubular. Cabe anotar que el reforzamiento podría ser en el interior del elemento, pero esto genera complicaciones en el proceso de fabricación [8].

Conclusiones

Los criterios de diseño para la conexión a momento en un pórtico resistente a momento están definidos por el comportamiento sísmico que se espera de la estructura. Sin embargo, dependiendo del tipo de perfil utilizado en los elementos tipo columna y viga, se puede tener mayor

información respecto al procedimiento de diseño y las diferentes especificaciones que hay. En el caso de elementos tipo PTE, a pesar de tener conocimiento sobre sus propiedades bajo condiciones de carga axial, corte y torsión; se requiere continuar con los estudios, investigaciones y ensayos relacionados con el comportamiento de perfiles PTE, bajo condiciones de flexión bajo cargas cíclicas.

La combinación de perfiles tipo I y perfiles PTE, genera una gran macro de opciones en relación a tipos y configuraciones de conexiones, las cuales se requiere seguir estudiando; y más aún en la actualidad por temas arquitectónicos y de salubridad. Se puede esperar que las conexiones entre perfiles PTE, se realicen soldadas y reforzadas, sean las conexiones de mayor aplicación para las condiciones en Colombia y por lo cual se debe tener muy en cuenta las relaciones ancho –espesor para determinar la sección del perfil a utilizar.

Los modelos matemáticos o modelos de elementos finitos (FE), son de gran ayuda y la implementación de estos ayuda a la evolución y estudio de casos particulares de conexiones. Estos modelos son de utilidad para generar datos de elementos y conexiones que no son ensayados. Así mismo, se debe tener en cuenta, que las modelaciones son representaciones y siempre se debe mantener el criterio profesional en la aplicación de los mismos para el análisis y el diseño de las conexiones, teniendo claro que cada conexión es diferente, según las cargas y condiciones sísmicas.

Actualmente, se está en espera de documentación relacionada con conexiones precalificadas para perfiles PTE, lo cual hace que este tema sea de gran importancia y que se deba tomar con cuidado si se tienen casos particulares en el análisis y diseño de conexiones con perfiles PTE. Más aún se debe tener claridad, que la geometría de los perfiles tubulares PTE estudiada fue la rectangular y que los perfiles circulares tienen comportamiento y condiciones de detallado completamente diferente.

Referencias

- AISC. (2011). "Steel Construction Manual, 14th edition". American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- Dutta, D., Wardenier, J., Yeomans, N., Sakae, K., Bucak, O. and Packer, J.A. (1998). Design Guide 7: For Fabrication, Assembly and Erection of Hollow Section Structures. CIDECT, Germany.
- AISC. (2016). "Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications" ANSI/AISC 358-16. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Colombia, 2010
- AISC. (2016). "Specifications for Structural Steel Buildings". ANSI/AISC 360-16. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes1, A500/A500M – 13, Nov. 1, 2013.
- Standard Specification for Hot-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing, A501/A501M – 14, Oct. 1, 2014
- Y. Liu, C. Málaga-Chuquitaype, A.Y. Elghazouli, "Response and component characterisation of semi-rigid connections to tubular columns under axial loads", ELSEVIER Journal of Engineering Structures 41 (2012) 510–532.
- M. Fadden and J. McCormick, "HSS-to-HSS seismic moment connection performance and design", ELSEVIER Journal of Constructional Steel Research 101 (2014) 373-384.
- Qian-Yi Song, Amin Heidarpour, Xiao-Ling Zhao, Lin-Hai Han, "Performance of flange-welded/web-bolted steel I-beam to hollow tubular column connections under seismic load", ELSEVIER Journal of Thin-Walled Structures 116 (2017) 250–264.
- X.C. Liua, Z.W. Yang, H.X. Wang, A.L. Zhang, S.H. Pu, and S.T. Chaia, L. Wu, "Seismic performance of H-section beam to HSS column connection in prefabricated structures" ELSEVIER Journal of Constructional Steel Research 138 (2017) 1-16.

- F. Ferrario, F. Iori, R. Pucinotti, R. Zandonini, “Seismic performance assessment of concentrically braced steel frame buildings with high strength tubular steel columns”, *ELSEVIER Journal of Constructional Steel Research* 121 (2016) 427–440.
- S. Mourad, A. Ghobarah and R. M. Korol, “Dynamic response of hollow section frames with bolted moment connections”, Butterworth Heinemann – ELSEVIER science 0141-0296(95)00002-x
- Matthew Fadden, Jason McCormick, “Finite element model of the cyclic bending behavior of hollow Structural sections”, *ELSEVIER Journal of Constructional Steel Research* 94 (2014) 64–75.
- M. Fadden, D. Wein and J. McCormick, “Cyclic Testing of Welded HSS-to-HSS Moment Connections for Seismic Applications”, Downloaded from ascelibrary.org by University of Michigan on 01/09/16. Copyright ASCE
- J. McCormick, “Connecting Hollow Structural Section Members with Through-Bolts”, Associate Professor, Civil & Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA
- Liangjie Qi, Jianyang Xue, Roberto T. Leon, “Experimental and analytical investigation of transition steel connections in traditional-style buildings”, *ELSEVIER Journal of Engineering Structures* 150 (2017) 438-450.
- A. Longo, R. Montuori, E. Nastri, V. Piluso, “On the use of HSS in seismic-resistant structures”, *ELSEVIER Journal of Constructional Steel Research* 103 (2014) 1-12.
- Demountable Steel and Composite Structures, *Elsevier Journal of Structures* 9, 1-12.
- Jakub, F., Paweł, K., Martin, K., Přemysl, P. (2017) Innovative Connection of Steel Profiles, Experimental Verification and Application, *Elsevier Structural and Physical Aspects of Construction Engineering, Procedia Engineering*, 190, pp. 215 – 222
- Jovašević, S., Correia, J.A.F.O., Pavlović, M., Rebelo, C., De Jesus, A.M.P., Veljković, M., Simões, L. (2016). Global fatigue life modelling of steel half-pipes bolted connections. *Elsevier XVIII International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals (ICMFM XVIII)*, *Procedia Engineering*, 160, pp. 278 – 284.
- Kidd, M., Judge, R., Jones, S.W. (2016). Current UK trends in the use of simple and/or semi-rigid steel connections. *Elsevier Journal of Case Studies in Structural Engineering*, 6, United Kingdom, pp 63-75.
- Lesani, M., Bahaari, M.R., Shokrieh, M.M. (2015). FRP wrapping for the rehabilitation of Circular Hollow Section (CHS) tubular steel connections, *Elsevier Journal of Thin-Walled Structures*, 90, pp. 216–234.
- Liu, X.C., Yang, Z.W., Wang, H.X., Zhang, A.L., Pu, S.H. and Chai, S.T., Wu, L. (2017). Seismic performance of H-section beam to HSS column connection in prefabricated structures, *Elsevier Journal of Constructional Steel Research*, 138, pp. 1-16.
- Liu, Y., Málaga-Chuquitaype, C., Elghazouli, A.Y. (2012). Behaviour of beam-to-tubular column angle connections under shear loads, *Elsevier Journal of Engineering Structures*, 42, pp. 434–456.

Bibliografía

- Bertini, L., Cera, A., Frenzo, F. (2014). Experimental investigation of the fatigue resistance of pipe-to-plate welded connections under bending, torsion and mixed mode loading, *Elsevier International Journal of Fatigue*, 68, pp. 178–185.
- Brian, U., Vipulkumar P., Dongxu, L, Farhad, A., (2017). Behaviour and Design of Connections for
- Mehdi, D., Mohammad, A. K. (2017). A parametric study into the new design of a steel energy-absorbing connection, *Elsevier Journal of Engineering Structures* 145, pp. 22-33.
- Nádia, Forti, C.S. João A.V. Requena, T., Forti, L.D. (2015). Parametric study of tubular KK multiplanar steel connections. *Elsevier Journal of Constructional Steel Research*, 114, pp. 188–195.

- Omid, R., Adel, Y. (2017). Experimental study discussion of the seismic behavior on new types of internal/external stiffeners in rigid beam-to-CFST/HSS column connections, *Elsevier Journal of Construction and Building Materials*, 136, pp. 574–589.
- Tudor, P., (2016) Steel Connections Post-Earthquake Fire Tests Setup, *Elsevier World Multidisciplinary Civil Engineering -Architecture -Urban Planning Symposium, (WMCAUS)*, Procedia Engineering, 161, pp. 133 – 136.
- Uribe, M. (2008). *Calificación de una conexión rígida de una viga I y una columna tubular rellena de concreto bajo la acción de cargas dinámicas*. Tesis para optar por el título de Magíster en Estructuras, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Wei, W., Mingxiao, L., Yiyi, C., Xiaogang, J. (2017). Cyclic behavior of endplate connections to tubular columns with novel slip-critical blind bolts, *Elsevier Journal of Engineering Structures*, 148, pp. 949–962.
- Yanglin, G. (2008). Double-angle shear connections with small hollow Structural section columns”, *Elsevier Journal of Constructional Steel Research*, 64, pp. 539–549.
- Zhi-Yu, W., Qing-Yuan, W. (2016). Yield and ultimate strengths determination of a blind bolted endplate connection to square hollow section column, *Elsevier Journal of Engineering Structures*, 111, pp. 345–36

Lean Construction: un cambio para la gestión de proyectos de obra

Jimmy Leonardo Suárez Díaz, Camila Andrea Barranco Molina

Programa de Ingeniería Industrial y Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería.

Universidad Católica de Colombia

Bogotá D.C., Colombia

jsuarez65@ucatolica.edu.co, cabarranco56@ucatolica.edu.co

Resumen:

La construcción es uno de los temas más dialogados en el mundo, en ella se encuentra el desarrollo económico y social de un país que abre las posibilidades a una alta calidad de vida. La construcción busca que el ser humano cree y desarrolle espacios para su progreso personal, profesional y espiritual mientras que para el sector económico hay una inversión que trae consigo beneficios como el empleo. Ante esta necesidad, los grandes países del mundo han generado consigo, herramientas y nuevas filosofías, con el fin de incrementar la calidad y las ganancias de un proyecto, y así mismo minimizar las pérdidas o mermas generadas por el mal manejo de la planeación y la formulación de los proyectos de obra. Una de las filosofías que ha generado una nueva ola en la gestión de proyectos es la filosofía Lean construction o construcción sin pérdidas, la cual se ha expandido desde los Estados Unidos y el continente europeo a todos los rincones del mundo. En el siguiente escrito, se pretende hacer un estudio de tipo cualitativo y descriptivo de esta filosofía y explorar la forma en que se puede aplicar este método en Colombia, para mitigar las pérdidas generadas en obras civiles y mejorar el desarrollo de la construcción. Se ampliará esta filosofía Lean, estudiando sus principios, casos concretos y se observará cómo ha logrado ser una práctica exitosa. Posteriormente, se realizará un análisis comparativo de la metodología Lean y la metodología tradicional, en el sector constructivo de Colombia.

Palabras clave: Lean Construction Construcción sin pérdidas Metodología tradicional de la construcción, Formulación de proyectos.

Abstract

xxxxxxx

Introducción

Los estudios realizados por las entidades gubernamentales del país, arrojan resultados poco favorables para el sector de la construcción en Colombia; los indicadores económicos de la construcción en el primer trimestre del año en curso, en comparación con el mismo periodo del año pasado, evidencian resultados negativos en indicadores como el valor agregado de la construcción con un -1,4%, la producción de materiales como el cemento gris con un -1,5% y en el concreto premezclado con un -7,2%; cifras que, a diferencia del 2016, fueron positivas, en estos mismos indicadores Fuente especificada no válida.

Lean Construction es un enfoque que permite maximizar el valor y minimizar las pérdidas que se generan en la construcción, al reemplazar la metodología tradicional. Para un ciclo de vida de un proyecto, la aplicación de los principios y herramientas de esta filosofía Lean puede llegar a ser el éxito en el sector de la construcción. Se entiende la palabra Lean como una filosofía de trabajo que busca alcanzar la excelencia en una empresa, es decir, que sus principios se puedan aplicar en todo tipo de proyecto y en todas sus fases, completando así las cinco necesidades básicas del ciclo de vida de un proyecto: inicio del proyecto, planeación, ejecución, control y cierre del mismo Fuente especificada no válida.

Metodología

Realizar una revisión de la literatura que permita identificar los factores determinantes de la filosofía Lean Construction en los proyectos de ingeniería, teniendo relevancia, la definición, importancia, relación que existe o pueda existir en la filosofía Lean Construction y las técnicas tradicionales de la construcción, así como las metodologías utilizadas por los diferentes autores para poder identificar las ventajas y las desventajas de la posible implementación de esta filosofía en Colombia.

Primera etapa: Etapa de revisión

Es necesario entender que la revisión es el paso previo que se lleva a cabo, antes de comenzar una investigación. Esta revisión permite acercarse al conocimiento de un tema contribuyendo a identificar qué se sabe y qué se desconoce respecto al tema de interés. Es una sinopsis que suma diferentes investigaciones y artículos relacionados con tema que se va a investigar, para saber cuál es el estado actual de este.

Dentro del proceso de investigación, la revisión se encuentra inicialmente en el proceso de justificación, para dar a conocer las metas, los objetivos, el alcance y la exposición de motivos, que fundamentan dicha investigación. El mismo también incluye una exploración de las metodologías utilizadas para darle solución a la investigación iniciada; Se evalúan las ventajas, inconvenientes y dificultades que presenta cada orientación metodológica y se aportan referencias

relevantes, que muestran la selección de una técnica de recolección de datos frente a otras técnicas alternativas. En síntesis, la revisión de la literatura se representa como un análisis crítico del tema que se tiene interés, que, a su vez, indica las similitudes y las inconsistencias en la literatura analizada. (Aveyard, 2010).

Segunda etapa: Ecuación de búsqueda

Definir tema de investigación y determinar patrón de búsqueda con palabras claves de la revisión literaria, según las bases de datos: EBSCOhost y ScienceDirect.

Se llevó a cabo una serie de búsquedas Prueba las cuales permitieron tener una visión del patrón de búsqueda adecuado, para el desarrollo de la investigación; dichas búsquedas se realizaron con el fin de seleccionar la información adecuada, que añade valor al estudio, Teniendo en cuenta las palabras clave definidas inicialmente; posteriormente se observaron los resultados derivados de cada búsqueda aplicada en las bases de datos, las cuales fueron documentadas en una bitácora para tener una trazabilidad de estas. En la búsqueda de los artículos se priorizaron las publicaciones en inglés, ya que el material existente supera al encontrado en habla hispana.

Tercera etapa: Selección de artículos

Definir criterios de publicación:

- Solo artículos de los últimos 10 años
- Valorar por título y resumen.
- Seleccionar por revisión completa del texto

Se eligieron en total 40 artículos, los cuales tuvieron que cumplir con los criterios descritos anteriormente.

Cuarta etapa: Extracción de información:

Para la extracción de la información, se utilizó el software MAXQDA, el cual ayudó a definir los nodos

de revisión adecuados para el estudio. Se ingresaron los artículos seleccionados, es decir, aquellos que cumplían con los criterios de inclusión para codificarlos y clasificar la información de una manera clara y concisa.

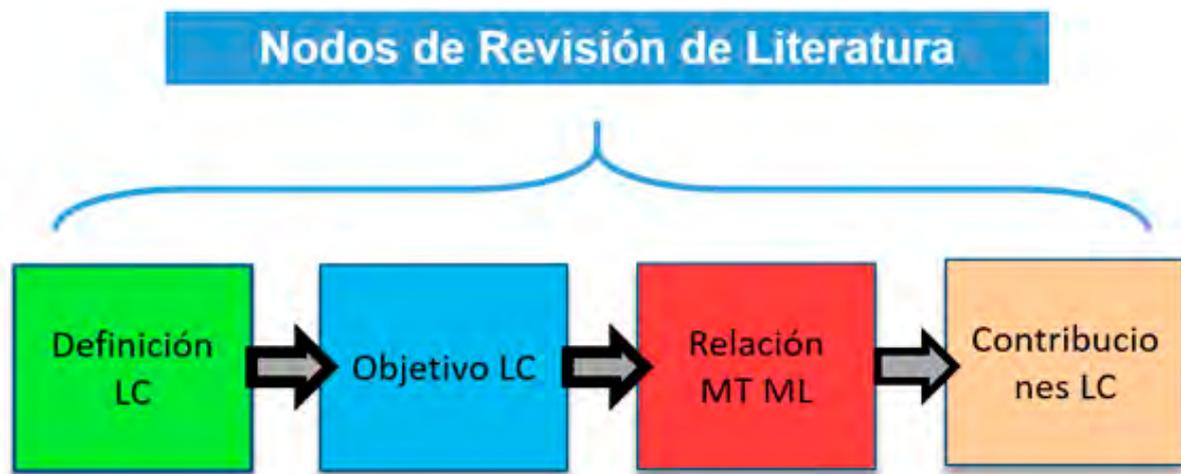


Figura 1. Nodos de revisión

Analizar y evaluar la filosofía Lean Construction

Con la información encontrada de los artículos seleccionados y teniendo como base los nodos de revisión de literatura, se realiza el análisis de los resultados.

Definición de Lean Construction

Lean Construction es un enfoque que permite maximizar el valor y minimizar las pérdidas que se generan en la construcción, reemplazando la metodología tradicional. Para un ciclo de vida de un proyecto, la aplicación de los principios y herramientas de esta filosofía Lean puede llegar a ser el éxito en el sector de la construcción. Se entiende la palabra Lean como una filosofía de trabajo que busca alcanzar la excelencia en una empresa, es decir, que sus principios se pueden aplicar en todo tipo de proyecto

y en todas sus fases, completando así las cinco necesidades básicas del ciclo de vida de un proyecto, los cuales son: inicio del proyecto, planeación, ejecución, control y cierre del mismo. (Progressa Global Lean, 2017).

Objetivo de Lean Construction

El objetivo principal de esta filosofía es minimizar las pérdidas en el desperdicio de materiales, mano de obra, costos, tiempo en transporte de material y maquinaria, tiempo de retraso en actividades y riesgos previsible en una obra de construcción y maximizar la calidad del proyecto a entregar con eficiencia y eficacia. Fuente especificada no válida.

Pérdidas generadas por la construcción

Para la filosofía Lean, todo lo que no asigna valor para el cliente, se denomina desperdicio o pérdida, que puede

ser eliminado. En otras palabras, las pérdidas son aquellas actividades que consumen recursos sin crear un valor por ello. En el nacimiento de la filosofía Lean Construction, se tuvieron en cuenta las pérdidas que se habían generado en la empresa Toyota. En una entrevista hecha a uno de los ingenieros en el año 1988, de esta compañía (Taiichi Ohno), se clasifica las pérdidas en siete tipos diferentes Fuente especificada no válida..

- Sobreproducción
- Tiempo de inactividad
- Transportes innecesarios
- Sobreprocesamiento
- Movimientos innecesarios
- Exceso de inventarios
- Defectos de calidad

Contribuciones

Por medio de los siguientes ejemplos de construcción, se observará cómo se aplica la filosofía Lean, y los resultados positivos que esta genera en diferentes tipos de edificaciones. Estos ejemplos se tomaron en diferentes lugares con el fin de mostrar la eficiencia de la metodología Lean en todos los tipos de construcción. Los países de los cuales se hacen referencia en los ejemplos son: Estados Unidos (California), Perú (Lima) y Colombia (Medellín).

Proyectos Hospitalarios en California

Estos proyectos se encuentran ubicados en Castro Valley, California, EEUU, fueron ganadores de los premios Tekla BIM 2010 debido a que gracias al uso de la filosofía Lean fue un proyecto 30% más rápido de salud, comparables en California. El primer edificio hospitalario fue el Three White Flint North (Tuner, 2017). Este edificio que cuenta con 14 pisos y 366000 pies cuadrados, hizo uso de la filosofía lean y tecnologías 3D de modelados. con el fin de identificar y resolver conflictos antes de darle comienzo a la construcción, de hecho, se le otorgó la certificación LEED por ser un edificio verde. El proyecto terminó con seis meses de anticipación y no necesitó más presupuesto que el determinado al inicio; lo que permitió que las firmas de diseño y construcción obtuvieran las máximas utilidades y

la productividad comercial aumento entre un 10 y 20% con las bases de referencia, según el tipo de actividad (Revista Ingeniería de Construcción, 2016).

Proyecto Condominio Villa Santa Clara – Perú

Este proyecto en Perú fue el pionero en Latinoamérica, que inició la práctica de la filosofía Lean. El proyecto cuenta con un área de 17,279 metros cuadrados, se conforma de 17 edificios de ocho pisos. La implementación Lean se hizo con el Last Planner, organizando un plan maestro y con diagrama de Gant se establecieron las actividades, de las cuales se cumplieron en el tiempo exacto en un porcentaje de 85% y el costo de la obra se redujo en un 22%, lo que permitió entregar la obra a tiempo, sin pérdidas totales (Revilla, 2012)

Proyecto Akacia. Conjunto de casas campesinas – Medellín Colombia

Buscando optimizar los recursos en el sistema constructivo, los ingenieros colombianos Pablo Álvarez y Erika Corrales adoptaron para el proyecto la filosofía Lean Construction, a partir, de los estudios realizados por el experto en Colombia de esta filosofía Luis Fernando Botero Botero, Ingeniero de la universidad EAFIT en Medellín. Los beneficios que se obtuvieron con la implementación Lean fueron realmente exitosos. Se entregaron las casas a tiempo a la interventoría, con una diferencia de 15 días a lo planeado y se redujeron los costos por un valor de 250 millones. La experiencia con el método Lean que adquirió este proyecto exigió cambios como el respeto del orden para cada actividad, una planeación cuidadosa con un control eficiente de cada actividad y la implementación de reuniones de seguimiento diario y semanal a los contratistas (Argos, 2015).

Conclusiones y posibles limitaciones

La filosofía Lean Construction es una metodología alcanzable, en referencia a que a lo largo de la investigación, se ha observado que su implementación es exitosa y fácil de manejar; en los casos concretos de otros países, se observa una mejora continua del flujo en los proyectos, gracias a la disminución de costos, recursos y tiempo; lo que permitiría ser discutido en un país como Colombia donde ampliaría las fronteras del desarrollo a nivel constructivo. Este estudio

se planteó con el fin de observar que la construcción es un factor importante para la economía y el desarrollo de un país, y que a comparación de otros países del mundo, Colombia necesita innovar en el sector de la construcción.

Lean Construction, facilita estas posibilidades y, además, ampliaría el mercado a nivel nacional e internacional con un buen manejo de esta filosofía.

Este trabajo de investigación llegará hasta la revisión conceptual y el estado del arte de la forma como se aplica actualmente esta filosofía Lean en Colombia, será objeto de futuros estudios, la implementación se hará en un escenario específico de construcción. Por lo anterior, son limitaciones propias del proyecto, el corto tiempo que se tiene para desarrollar el trabajo, y en congruencia con los objetivos planteados, la escasez de recursos bibliográficos y falta de conocimiento por parte del gremio constructor de la existencia de esta metodología.

Bibliografía

- American Concrete Institute. (2014). Chapter 4 — Structural Systems Requirements. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-S14, and "Commentary". ACI 318RS-14)*. Farmington Hills, Estados Unidos: American Concrete Institute, 2014, pág. 58
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Título C – Concreto estructural. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá D.C.: Diario Oficial, 2010
- Building Officials Code Administrators International. (2000). *International Building Code*. 2000.
- C.E.E.I GALICIA, S.A., (2010). *Como realizar un estudio de mercado*. Santiago de Compostela, España: CEEI GALICIA, 2010
- Cámara Colombiana de la Construcción. Camacol. (2014). Noticias:. *Cámara Colombiana de la Construcción CAMACOL*. Extraído el ¿? de <https://camacol.co/noticias/innovación-clave-para-la-competitividad-del-sector-de-la-construcción>
- Carreño, A. D. (2015). *Estudio de la prefabricación en concreto reforzado y su influencia en la construcción de estructuras en Colombia*. Trabajo de grado para optar por el grado de Maestría de en Ingeniería Civil. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá D.C., Colombia
- Casanova, S. L. y Rodriguez, P. (2012). *Caracterización física de ligantes asfálticos con base para mezclas tibias*. Proyecto de grado para optar al título de ingeniero civil. Facultad de Ingeniería. Ingeniería civil. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C., Colombia.
- D, R. (2004). *Fundamentos de Marketing: Teoría y Experiencia*. Buenos Aires : Granica S.A.
- Diaz, H. E. (2017). tesis estudio de mercado. [En línea] [Citado el: 11 de Mayo de 2017.] http://www.academia.edu/8632318/tesis_estudio_de_mercado.
- Fernández, Á. (2004). *Investigación y técnicas de mercado*. Madrid : ESIC.
- Ferré, T., José, F. N., Jordi, (1997). *Los Estudios de Mercado*. Madrid: Diaz de Santos.
- Grupo de Trabajo de Promoción de la ICN. (2010). *Manual de Buenas Prácticas para la elaboración de Estudios de Mercado*. Estambul: Comisión Federal de Competencia de México y la Fiscalía Nacional Económica de Chile
- Ho, S., et al. (2006). Study of recycled polyethylene materials as asphalt modifiers.
- Koskela, L. (2003). *Is structural change the primary solution to the problems of construction?* Watford : Journal Building Research & Information, pp. 85-96
- marovi817. 2012. Guía de apoyo al emprendedor. Slideshare. [En línea] 21 de Agosto de 2012. [Citado el: 11 de Mayo de 2017.] <https://es.slideshare.net/marovi817/libro-estudio-de-mercado>.

- Melguizo, M. (2007). *Cómo escribir un artículo científico*. Medellín, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana, 2007
- Moreno, R. (2010). *Economía en el Nacional*. [En línea] *Economía Política*, 17 de Junio de 2010. [Citado el: 14 de Mayo de 2017] <http://economiapoliticaweb.blogspot.com.co/2010/06/clase-9-teoria-del-consumidor-y-del.html>
- Nieves, J. y Carreño, J. (2015). *Estudio del efecto de aditivos reductores de temperaturas*. Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Pavimentos. Facultad de Ingeniería. Especialización en Ingeniería de Pavimentos. Universidad Católica de Colombia. Bogota D.C.: Colombia.
- Orjuela, S. y Sandoval, P. (2002). *Guía del estudio de mercado para la evaluación de proyectos*. Santiago de Chile
- Pasquire, Christine, Gibb, Alistair y Blismas, Nick. (2005). *What Should You Really Measure If You Want to Compare Pre-fabrication with Traditional Construction?* Kenley: Rusell. 1877040347
- Precast/Prestressed Concrete Institute. (2010). *Floors and Roofs*.
- Ramirez, M. (2011). Pavimentos con polimeros reciclados. Envigado.
- Reguant, M. y Torrado, M. (2016). *El método Delphi*. Barcelona : REIRE. 2013-2255
- Rodríguez, W. (2013). *Gerencia de Construcción y del tiempo-costo*. Lima: Macro E.I.R.L., 2013. 978-613304-102-1.
- Segura, J. (2011). *Estructuras de Concreto I*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011. 978-958-99888-0-0.
- U.S. Green Building Council (USGBC). (2005). *An Introduction to the U.S. Green Building Council and the LEED Green Building Rating System*. Washington, D.C.