

Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Forestal



**“Estudio técnico en la producción de adoquines a partir de residuos
de madera de tarimas, Cartago, Costa Rica”**

**Trabajo final de graduación para optar por el título de
Ingeniería Forestal con el grado académico de
Licenciatura**

Luis Diego Méndez Mejías

Cartago, Noviembre 2014

Resumen

Se aplicaron tres tipos de tratamientos a las partículas de *Pinus sp* proveniente de la reutilización de tarimas: lavado con agua caliente, sin lavar y sin lavar con adición de carbonato de calcio. Estas partículas se utilizaron en mezclas de cemento, arena y polvo de piedra en diferentes proporciones en relación al peso para la fabricación de adoquines, a los cuales se les evaluó el endurecimiento utilizando la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y la densidad durante los primeros 21 y 15 días respectivamente, absorción de agua, módulo de ruptura (MR) en flexión, resistencia a la abrasión luego de 28 días de su fabricación y resistencia al ataque de hongos de pudrición durante 16 semanas. Los resultados mostraron que el endurecimiento ocurre a los 8 días con la variación del VPU y la densidad. La absorción de humedad fluctúa entre 15 y 22% con una tendencia a disminuir conforme disminuye la proporción o carga de partículas de madera. El MR varió de 0,40 a 1,23 MPa y los adoquines con partículas de madera sin lavar y agregado cal presentaron las mayores diferencias significativas. En resistencia a la abrasión, los adoquines con partículas de madera sin lavar reportan los mejores resultados. Finalmente se concluyó que la mezcla con proporciones de 60:40 (concreto: madera) para los adoquines con partículas de madera lavadas y agregado cal, es una de las que presenta un buen comportamiento en los parámetros evaluados. Además que no son atacados por los hongos de pudrición.

Palabras claves: Material de construcción, residuos, ultrasónico, absorción, adoquines, Costa Rica.

Abstract

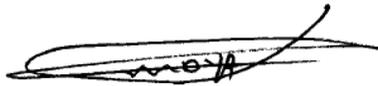
Three different treatments were applied to wooden particles from reused pallets of *Pinus sp*: hot water wash, unwashed and unwashed with calcium carbonate. These wooden particles were incorporated with cement, sand and stone powder to form a mixture in different proportion in relation to weight to manufacture blocks, which were evaluated in hardening using the velocity of ultrasonic pulse (VPU) and the density during the first 21 and 15 days respectively, water absorption, modulus of rupture (MR) in flexion, abrasion resistance after 28 days of manufacture and resistance to attack by decay fungi during 16 weeks. Results showed that hardening occurs at 8 days with variation in the VPU and density. Moisture absorption varies between 15 and 22% with a tendency to decrease as the proportion decreases or as the wooden particles load decreases. MR ranged from 0.40 to 1.23 MPa and blocks with unwashed wooden particles and calcium carbonate showed the highest significant differences. In abrasion resistance, blocks with unwashed wooden particles reported the best results. Finally, it was concluded that, the mixture with 60:40 proportion (concrete: wood) for blocks with washed wooded particles and calcium carbonate, shows a good performance in all the parameters evaluated. Besides, these blocks are not attacked by decay fungi.

Keywords: construction material, wastes, ultrasonic, absorption, blocks, Costa Rica.

Esta Tesis de graduación ha sido aceptada por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura.

Estudio técnico en la producción de adoquines a partir de residuos de madera de tarimas, Cartago, Costa Rica

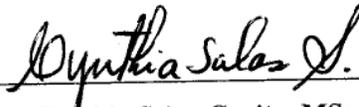
Miembros del Tribunal Evaluador



Roger Alonso Moya Roque, Ph.D.

Director de tesis

Escuela de Ingeniería Forestal, TEC



Cynthia Salas Garita, MSc.

Lector de tesis

Escuela de Ingeniería Forestal, TEC



Freddy Muñoz Acosta, Ph.D.

Lector de tesis

Escuela de Ingeniería Forestal, TEC



Luis Diego Méndez Mejías

Estudiante

Dedicatoria

Dedico esta tesis y toda mi carrera universitaria a Dios, a mi querida madre Elia, a mis hermanos y sobrinos.

Agradecimientos

A Dios, por darme fuerza en los momentos difíciles y permitirme seguir adelante a pesar de todos los obstáculos.

A mi familia por su apoyo incondicional en todos los momentos en que los necesite.

Al Ph. D. Roger Moya Roque, tutor de tesis, por su apoyo, confianza y guía en todo momento.

A todos los profesores de la carrera de Ingeniería forestal, por su transmisión de conocimientos, consejos y buenos deseos.

Al personal del CIIBI y otros departamentos del TEC, por el apoyo y ayuda durante toda mi carrera.

A todas las personas que colaboraron de una u otra manera en el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos, por convertirse en un pilar importante en esta etapa de mi vida, por su apoyo y compañía en todo mi período de estudio.

"Pon en manos del Señor todas tus obras, y tus planes tendrán éxito"

Proverbios 16:3

Índice general

Resumen	i
Abstract	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	v
Índice de figuras	vii
Índice de cuadros	viii
Introducción	9
Material y métodos	11
Selección de la forma de adoquín	11
Procedencia del material utilizado	11
Procesamiento de materia prima	12
Tratamientos de las partículas y formulación de las mezclas	12
Caracterización del material utilizado	13
Fabricación de las muestras de adoquines	13
Curado y acondicionamiento	14
Densidad y endurecimiento	14
Absorción de agua	15
Determinación del módulo de ruptura de los adoquines de concreto	16
Resistencia a la abrasión	16
Ensayo acelerado de resistencia a la pudrición natural	17
Análisis estadísticos	18
Resultados	19
Caracterización del material utilizado	19
Endurecimiento y densidad	19
Absorción de agua, módulo de ruptura en flexión y desgaste	22

Ensayo acelerado de resistencia a la pudrición natural.....	23
Análisis de resultados	25
Caracterización del material utilizado.....	25
Endurecimiento y densidad	25
Absorción de agua, módulo de ruptura en flexión y desgaste	27
Ensayo acelerado de resistencia a la pudrición natural.....	28
Conclusiones	29
Ficha técnica	30
Referencias	31

Índice de figuras

Figura 1. Forma y dimensiones del adoquín fabricado	11
Figura 2. Máquina para la fabricación de los adoquines (a) y forma de los adoquines (b).....	14
Figura 3. Distribución del tamaño de las partículas de madera (a), partículas de polvo de piedra (b) y partículas de arena (c) en porcentaje, en relación al peso utilizado en la fabricación de adoquines	19
Figura 4. Velocidad de ultrasonido a través del tiempo para cuatro mezclas con diferentes proporciones en base a tres tratamientos aplicados.....	20
Figura 5. Densidad a través del tiempo para cuatro mezclas con diferentes proporciones en base a tres tratamientos aplicados	21
Figura 6. Correlación entre densidad y velocidad de ultrasonido para cuatro mezclas con diferentes proporciones en base a tres tratamientos aplicados.....	22
Figura 7. Comportamiento de los ensayos de absorción de humedad (a), módulo de ruptura (b) y resistencia a la abrasión (c) para las diferentes mezclas en sus diferentes proporciones, en base a los tratamientos aplicados a las partículas	23

Índice de cuadros

Cuadro 1. Proporciones por peso (kg) de los materiales a utilizar en cada mezcla de acuerdo a los tratamientos aplicados a las partículas	13
Cuadro 2. Criterio de clasificación de la resistencia natural de la madera al ataque de los hongos de prueba en laboratorio (ASTM, 2003).....	18
Cuadro 3. Porcentaje promedio de la pérdida de peso de los bloques de prueba bajo pudrición durante 16 semanas en base a dos tipos de hongos	24

Introducción

En la actualidad el crecimiento constante de la población mundial ha originado diferentes problemas, entre las cuales se destaca el deterioro ambiental por la generación de desechos no degradables (Máas, 2012). La construcción de edificios y otras obras, así como las demoliciones de estructuras, no escapan de esta realidad, ya que producen alta cantidad de residuos, a pesar de las regulaciones ambientales y leyes creadas para mejorar el manejo de los mismos (Ashori *et al.*, 2012a).

De manera análoga, en las industrias de procesamiento de madera es común encontrar residuos como: aserrín, astillas y piezas cortas, que muchas veces son simplemente desechados o tienen un bajo costo para la venta; lo que provoca una buena opción para promover usos y aplicaciones a este tipo de residuos (Serrano y Moya, 2011) y consecuentemente dar una solución adecuada al manejo de los mismos (Mymrin *et al.*, 2014). El manejo de los residuos pos-consumo, como por ejemplo las tarimas de embalaje, no cuenta con adecuado proceso de eliminación. Las tarimas juegan un papel importante en la economía actual, ayudando en transporte eficiente y fiable de mercancías. Sin embargo, tienen una vida corta y por lo tanto consumen grandes cantidades de recursos y a su vez producen entre 2-3% de los residuos existentes (Buehlmann *et al.*, 2009). En caso de Costa Rica, las tarimas son uno de los principales productos de consumo de madera (Serrano y Moya, 2011) y se estima que en el país se producen cerca de 5 millones de unidades anuales (Barrantes y Ugalde, 2013).

Por otra parte, existen otro tipo de productos que cumplen funciones específicas, como por ejemplo los adoquines a base de cemento. Este producto permite el desplazamiento de las personas y vehículos a través de una red de infraestructura como caminos, aceras, parqueos, pisos y hasta como elementos decorativos en terrazas permitiendo excelentes acabados (Asghari *et al.*, 2014). El adoquín cubre superficies a través de piezas individuales que permiten prevenir inundaciones o escorrentía de agua en época de lluvia al presentar características permeables (Park *et al.*, 2014). Debido a esto, es posible diseñar, validar y mantener distintas secciones de firmes, permeables y capaces de minimizar las inundaciones en las ciudades (Fontaneda, 2014).

En los próximos años, las industrias (construcción y de madera) tienen el reto de incorporar la sostenibilidad en sus procesos de producción, ya sea mediante la búsqueda de nuevas materias primas y productos más respetuosos del medio ambiente y/o contribuir a la reducción de CO₂ a la

atmósfera (Torkaman *et al.*, 2014). Ante tal razón surge la iniciativa de proponer mezclas de concreto en las cuales se sustituyan proporciones de los agregados pétreos por residuos industriales (Serrano y Pérez, 2011), como por ejemplo el uso de los residuos de madera proveniente de las tarimas en los adoquines para tránsito de personas. Dicha mezcla es conocida como compuesto de concreto-madera (Khorsandnia *et al.*, 2012).

Estos compuestos de madera-cemento se desarrollaron después de la Primera Guerra Mundial debido a la escasez de acero y hormigón (Khorsandnia *et al.*, 2012) y han sido utilizados en la fabricación de materiales de construcción durante más de 60 años (Tabarsa y Ashori, 2011). Esta clase de materiales de construcción son fabricados mediante la unión de partículas de madera o fibras con mezclas de cemento o mortero generando una alternativa atractiva para su uso (Cheumani *et al.*, 2011). Un ejemplo de esto son los tableros de partículas de madera-cemento que han estado en el mercado durante mucho tiempo y son utilizados por su baja densidad y propiedades relevantes (Tittlein *et al.*, 2012).

Los compuestos de madera-cemento tienen el potencial para proporcionar una amplia gama de productos (Ashori *et al.*, 2012b). Las principales ventajas de estos compuestos se han centrado en su resistencia a la descomposición y al ataque de insectos, propiedades acústicas y propiedades de aislamiento térmico (Tabarsa y Ashori, 2011). Además, se tiene que estos compuestos son una oportunidad para la rehabilitación energética de edificios y la construcción sostenible (Vergara *et al.*, 2013). Estas ventajas sugieren su posible aplicación como un reemplazo para los materiales de construcción tradicionales y compuestos de madera convencionales en techos, suelos, paredes para disminución de ruido (Nasser *et al.*, 2014). El refuerzo de hormigón por fibras de madera da un material compuesto que puede ser utilizado en muchas aplicaciones tales como encofrados, pisos, techos falsos, soleras y bloques de mampostería interior (Taoukil *et al.*, 2013).

Ante tales oportunidades, esta investigación se tiene como objetivo determinar la viabilidad de utilizar residuos de madera de tarimas en la fabricación de adoquines, con el fin de obtener un producto ambientalmente sostenible. Determinando las proporciones adecuadas de la mezcla cemento-arena-polvo de piedra y partículas de madera proveniente de tarimas desechadas luego de su uso. En cada mezcla analizada se determinó, el tiempo de curado por velocidad ultrasónica, la variación de la densidad durante el curado, la resistencia a la pudrición acelerada, la absorción de agua, el módulo de ruptura en flexión y la resistencia a la abrasión. Dicha información permitirá desarrollar una ficha técnica del producto con las especificaciones técnicas y los parámetros evaluados con base en los ensayos ejecutados.

Material y métodos

Selección de la forma de adoquín

El adoquín utilizado en el presente estudio fue de forma hexagonal (Figura 1). Sus dimensiones fueron de 11,5 cm de lado y 8 cm de espesor, lo que representa un volumen de $2748,76 \text{ cm}^3$. Se requiere una cantidad de 29 adoquines con este tipo de diseño y dimensiones para cubrir un m^2 de superficie. Fue seleccionada esta forma con la idea de innovar en el mercado, ya que es un diseño poco comercializado.

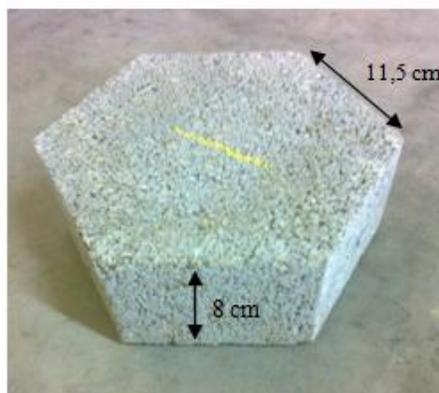


Figura 1. Forma y dimensiones del adoquín fabricado.

Procedencia del material utilizado

El material utilizado se obtuvo de la Asociación Solidarista de Empleados de Mabe Industrial (ASEMABE), ubicada dentro de las instalaciones de la empresa MABE, en la provincia de Heredia, Costa Rica ($9^{\circ}58'34.69''$ latitud norte y $84^{\circ}6'45.29''$ longitud oeste). La madera fue extraída de tarimas tipo europeas de 80 cm x 120 cm de la especie *Pinus sp.*, la cual representa un desecho para dicha empresa. Así mismo, la arena, polvo de piedra y cemento utilizado proviene de las empresas comercializadoras que abastecen a la asociación en dicha provincia. En el caso del cemento se utilizó el de uso general tipo UG-TRCR 383:2004, en presentación de bolsas de 50 kg, producido en Holcim, Aguacaliente de Cartago.

Procesamiento de materia prima

Las tarimas fueron desarmadas en piezas individuales, eliminando todos los componentes de tipo metálico como grapas, clavos y otros. Luego, la madera fue astillada en una máquina astilladora marca NOGUEIRA modelo DPM-2, para obtener astillas de aproximadamente 3,5 cm de largo por 2 cm de ancho. Seguidamente las astillas fueron molidas en un molino de fabricación propia hasta obtener partículas de una dimensión menos a 8mm. La arena y el polvo de piedra fueron utilizados tal como los proporcionó ASEMABE.

Tratamientos de las partículas y formulación de las mezclas

Las partículas de madera fueron sometidas a tres tipos de tratamiento, los cuales consistieron en:

Lavado de las partículas (T1): Las partículas de madera fueron hervidas en agua a aproximadamente 100 °C por un período de 1 hora removiendo constantemente. Al final de este período las partículas fueron lavadas con agua fría hasta que estas estuvieran completamente frías. Luego fueron secadas a temperatura ambiente por un periodo de una semana y posteriormente fueron colocadas en un cuarto con condiciones controladas (Temperatura de 22 °C y 66% de humedad relativa) hasta obtener un 12% de contenido de humedad.

No lavado de las partículas (T2): Las partículas obtenidas del proceso de molido fueron utilizadas directamente en la fabricación de adoquines.

No lavado de las partículas más adición de carbonato de calcio (T3): A las partículas de madera se les agregó carbonato de calcio en una cantidad equivalente al 13% de su peso y luego fueron utilizadas en la fabricación de los adoquines.

Mezcla patrón: La mezcla a utilizar para fabricar los adoquines consistió en no agregar partículas de madera, por tanto la mezcla a utilizar en la fabricación de estos adoquines está compuesta por cemento, arena y polvo de piedra.

En lo referente a la formulación de las mezclas, se definieron cuatro tipos de mezclas, las cuales varían por las proporciones de peso de las partículas de madera de acuerdo al tratamiento con el que se fabricaron los adoquines (Cuadro 1).

Cuadro 1. Proporciones por peso (kg) de los materiales a utilizar en cada mezcla de acuerdo a los tratamientos aplicados a las partículas.

Mezcla	Partículas de madera		Cemento (% / Peso)	Arena (% / Peso)	Polvo de piedra (% / Peso)
	% / Peso	% / Volumen			
Patrón	0	0	15,20	49,24	35,56
1	5,83	50	15,20	45,84	33,11
2	4,69	40	15,20	46,67	33,49
3	3,49	30	15,20	47,19	34,09
4	2,43	20	15,20	47,78	34,55

Caracterización del material utilizado

Se caracterizó el material utilizando un proceso de tamizado. Para ello, se tomaron 10 muestras de 95-105 gramos, estas fueron tamizadas en una columna de tamices de 0,25 mm, 0,425 mm, 1 mm, 1,7 mm, 2 mm, 3,35 mm, 4mm, 6,7 mm y 8 mm, durante un período de 2 a 3 minutos. Luego de transcurrido ese tiempo fue pesado el material que quedaba en cada uno de los tamices utilizados. La distribución del tamaño de partícula fue definido por el peso de las partículas retenidas por tamiz entre el peso total de la muestra utilizada, expresado porcentualmente. Para el caso del cemento se utilizó el cemento de uso general tipo UG-TRCR 383:2004. La información obtenida del proceso de tamizado fue utilizada para determinar el índice de finura de los materiales (Ecuación 1).

$$Indice\ de\ finura = \frac{\sum \text{retenida acumulada} - \text{Porcentaje retenido en fondo}}{100} \quad (1)$$

Fabricación de las muestras de adoquines

Para fabricar los adoquines se calculó la densidad necesaria con la que se deseaba fabricar el adoquín y luego se calculó el volumen, para finalmente determinar la cantidad de material requerida en kilogramos. Utilizando las proporciones establecidas en el cuadro 1, y el número de adoquines requeridos para las pruebas a ejecutar, se calculó la cantidad, en peso, de los diferentes elementos que componen el adoquín (polvo de piedra: cemento: partículas de madera). Entonces los materiales fueron dispuestos en una mezcladora donde se le fue agregando agua poco a poco hasta lograr

obtener una mezcla homogénea con la consistencia deseada al punto de presionar la mezcla con la mano y que esta no escurriera agua. Una vez que la mezcla estaba preparada, fue vertida en un molde, y colocada en la máquina donde se aplicó una compresión de 100 kg/cm^2 y una vibración (Figura 2a). El molde utilizado permitió obtener dos adoquines por cada prensada (Figura 2b). Este proceso fue realizado para cada mezcla en cada uno de los tratamientos.



Figura 2. Máquina para la fabricación de los adoquines (a) y forma de los adoquines (b).

Curado y acondicionamiento

Los adoquines fueron cubiertos con plástico luego de fabricados, esto para evitar la pérdida de humedad. Durante este período los adoquines fueron humedecidos diariamente con agua durante ocho días. Esto permite una buena hidratación del cemento utilizado en la fabricación de los adoquines y así obtener un endurecimiento satisfactorio.

Densidad y endurecimiento

La densidad de los adoquines fue determinada utilizando el peso y el volumen de estos. Fueron seleccionadas 4 muestras por cada mezcla para cada tratamiento, las cuales fueron pesadas de día por medio durante 15 días. Se calculó el volumen de los adoquines de acuerdo a su forma y su

altura, correspondiente a un volumen de 2748,76 cm³ aproximadamente. Luego fue aplicada la ecuación 2:

$$\text{Densidad (Kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{masa (kg)}}{\text{volumen (m}^3\text{)}} \quad (2)$$

El endurecimiento del adoquín fue determinado a través de mediciones de velocidad ultrasónica obtenidos con un ultrasonido el cual consistió en colocar dos transductores, uno emisor y otro receptor en la muestra fabricada. Se calcula la velocidad de pulso midiendo tiempos de transmisión de un lado a otro. Las mediciones fueron realizadas de día por medio durante 21 días con el fin de obtener el comportamiento de los datos respecto al tiempo de curado.

El tiempo de la onda de ultrasonido se determinó utilizando un mismo sentido de medición en el adoquín, el cual fue previamente marcado. Las mediciones se llevaron a cabo utilizando el equipo de ultrasonido SYLVATESTDUO con transductores de 22 kHz. En la configuración de este dispositivo se estableció realizar 4 lecturas por medición. Los transductores fueron colocados en la parte central del lado de medición a una distancia de 20 cm un extremo del otro. La velocidad de ultrasonido fue calculada utilizando la Ecuación 3:

$$V = \left(\frac{L}{\frac{T}{1000}} \right) * 60 \quad (3)$$

Donde:

V = velocidad de ultrasonido en km * min⁻¹

L = longitud de la muestra en metros.

T = tiempo que tarda onda de ultrasonido de un extremo al otro del adoquín en microsegundos (μs).

Absorción de agua

La absorción de agua de los adoquines se determinó luego de 28 días desde su fabricación, con el seguimiento de la norma **INTE 06-02-13 (ASTM C140)**, (INTECO, 2006). Para la realización de este ensayo se utilizaron dos adoquines de cada mezcla para cada tratamiento. Este ensayo consistió en sumergir los adoquines durante 24 horas en una pila o cámara con agua, transcurrido este tiempo fueron sacados del agua, se dejaron escurrir por un minuto aproximadamente y se les secó el agua superficial para luego pesarlo y obtener el peso saturado. Posteriormente fueron dispuestos en un horno de secado durante 24 horas a 105° C, transcurrido este tiempo las muestras fueron pesadas

nuevamente para obtener su peso anhidro. Luego se calculó el porcentaje de absorción de agua (Ecuación 4):

$$\text{Absorción de agua (\%)} = \frac{\text{Peso saturado del adoquín} - \text{Peso seco del adoquín}}{\text{Peso seco del adoquín}} \times 100 \quad (4)$$

Determinación del módulo de ruptura de los adoquines de concreto

Esta propiedad se determinó luego de 28 días de fabricados los adoquines, se utilizaron dos adoquines de cada mezcla para cada tratamiento, las cuales se dejaron sumergidos en agua por 24 horas antes de realizar el ensayo. Al momento de la ejecución del ensayo los adoquines fueron retirados del agua se midió las dimensiones de longitud, ancho y espesor y se dejaron escurrir durante un minuto aproximadamente sobre una maya, luego se secó el agua superficial de las muestras y se procedió a realizar el ensayo. El módulo de ruptura del adoquín fue determinado utilizando la norma INTE 06-02-14-06 (INTECO, 2006). El adoquín fue sometido a una carga de peso, con una velocidad que produjo un aumento en el esfuerzo cercano a 0,5 MPa por segundo hasta que la muestra presentara una falla (INTECO, 2006). Posteriormente se calculó el módulo de ruptura del adoquín (Ecuación 5):

$$MR = \frac{3PL}{2BH^2} \quad (5)$$

Donde:

MR = Módulo de ruptura, en MPa.

P = Carga máxima aplicada, en N.

L = Distancia entre los ejes de los apoyos, expresados en mm.

B = Longitud del eje menor del rectángulo inscrito, expresado en mm.

H = Espesor del adoquín, expresado en mm.

Resistencia a la abrasión

En la ejecución de este ensayo se utilizaron dos adoquines de cada mezcla para cada tratamiento y la norma INTE 06-02-15-07 (INTECO, 2006). La abrasión se determinó con la medida del desgaste producido en la cara de vista del adoquín, al ser sometido a desgaste por rozamiento de un disco metálico ancho y arena, 28 días después de su fabricación. La máquina utilizada disponía de una tolva donde se colocó el material abrasivo que era arena y un carro para situar el adoquín. Una vez situado el adoquín en contacto con el disco de abrasión, se procedió de manera simultánea a la

apertura de la válvula de control del flujo de arena y al arranque del motor, de forma que el disco girará a 75 revoluciones en $60 \text{ s} \pm 3\text{s}$. Transcurridas 75 vueltas del disco, se cerró el flujo de arena y se detuvo el motor. El valor de la longitud de huella, medida, en la que logra introducirse el disco en la cara de vista del adoquín, no fue superior a 23 mm, en promedio para las muestra sometidas al método de ensayo (INTECO, 2006).

Ensayo acelerado de resistencia a la pudrición natural

Para realizar este ensayo, se fabricaron tres adoquines de cada mezcla para cada tratamiento. De los adoquines fueron extraídas 260 muestras de 2 cm x 2 cm x 2 cm. El ensayo acelerado de resistencia a la pudrición natural se llevó a cabo siguiendo la metodología de la norma ASTM designación D-2017-81 (ASTM, 2003). Esta consistió en secar las muestras en un horno durante 24 horas a 100°C y luego se determinó su peso anhidro. Seguidamente, las muestras fueron hidratadas durante 24 horas en un recipiente con agua, luego de esto se esterizaron en una autoclave a 115°C durante dos horas. Posteriormente, estas fueron colocadas en cámaras de pudrición (dos muestras por cámara), las cuales consistían en frascos de vidrio con un medio de cultivo suelo bloque. En este caso fueron utilizados dos especies de hongos *Trametes versicolor* y *Lenzites Acuta*, 130 muestras por cada tipo de hongo. Las muestras permanecieron en contacto con el hongo durante 16 semanas. Transcurrido este tiempo se retiró el hongo adherido a las muestras y nuevamente fueron secadas durante 24 horas a 100°C para obtener el peso después del ataque. Finalmente fue calculada la pérdida de peso (Ecuación 6).

$$Pp (\%) = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (6)$$

Donde:

$Pp (\%)$ = Porcentaje de pérdida de peso debido al ataque.

P_1 = Peso anhidro inicial del bloque (gramos).

P_2 = Peso anhidro del bloque después del ataque (gramos).

El grado de resistencia al ataque de los hongos se determinó de acuerdo con la clasificación propuesta por la norma ASTM (2003), (Cuadro 2).

Cuadro 2. Criterio de clasificación de la resistencia natural de la madera al ataque de los hongos de prueba en laboratorio (ASTM, 2003).

Promedio de pérdida de peso (%)	Grado de resistencia al hongo de prueba	Clase de resistencia
0 a 10	Altamente resistente	A
11 a 24	Resistente	B
25 a 44	Moderadamente resistente	C
45 o más	Ligeramente resistente a no resistente	D

Análisis estadísticos

El tamaño de las partículas se clasificó calculando los porcentajes de material retenidos en cada uno de los tamices utilizados.

Para la velocidad de endurecimiento y la densidad, se determinaron modelos de regresión agregando las ecuaciones y curvas del mejor ajuste para los datos, con la que se obtuviera los mejores coeficientes de determinación (R^2). Además, la densidad fue correlacionada linealmente con la velocidad de pulso ultrasónico.

A los resultados obtenidos de los ensayos de absorción de humedad, módulo de ruptura y resistencia a la abrasión, se les aplicó una prueba t-student ($\alpha=0,01$) a los diferentes tratamientos y proporciones, además se calcularon los intervalos de confianza para determinar las diferencias significativas presentes entre tratamientos para cada una de las mezclas.

A los resultados obtenidos del ensayo acelerado de resistencia a la pudrición natural, se les aplicó un análisis de varianzas (ANOVA), para estimar la significancia de las fuentes de variación en los datos. La existencia de diferencias significativas entre los promedios para cada variable fue verificada mediante la prueba de Tukey ($P<0,01$).

Resultados

Caracterización del material utilizado

El análisis de la distribución del tamaño de partículas en relación al peso, mostró que tanto para las partículas de madera como para las de polvo de piedra, las dimensiones entre 6,7 - 4 mm y 3,35 - 2 mm representan los mayores valores entre 48 - 69 % en relación al peso (Figura 3a y 3b). Para el caso de las partículas de arena, las dimensiones entre 3,35 - 2 mm y 1 - 0,425 mm, es donde se tiene la mayor cantidad de partículas en relación al peso, representando un 49% aproximadamente (Figura 3c). En tanto, para las partículas de arena y polvo de piedra entre el 12 y 20 % presenta dimensiones entre 1,7 y 1 mm y entre 5 y 6% de las partículas presenta dimensiones menores a 0,25 mm, a diferencia de las partículas de madera que muestra un 8% y menos de un 1% respectivamente en partículas con estas dimensiones (Figura 3).

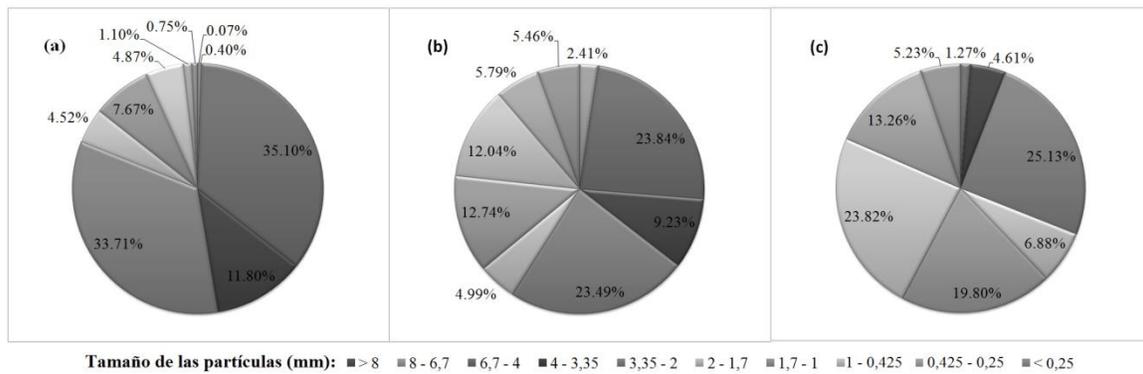


Figura 3. Distribución del tamaño de las partículas de madera (a), partículas de polvo de piedra (b) y partículas de arena (c) en porcentaje, en relación al peso utilizado en la fabricación de adoquines.

Endurecimiento y densidad

La variación del endurecimiento de las diferentes mezclas, medida por la velocidad ultrasónica, se muestra en la figura 4. En ella se puede observar que los adoquines fabricados sin partículas de madera es donde se presenta la mayor velocidad de ultrasonido. Así mismo se observa que independientemente del tipo de mezcla y/o tratamiento de las partículas, la velocidad de ultrasonido tiene un crecimiento desde su fabricación hasta el día 9 aproximadamente y luego de este día la velocidad empieza a mantenerse.

Al estudiar cada una de las proporciones, en la mezcla 50:50 se observa que cuando los adoquines son fabricados con partículas sin lavar y lavadas, presentan valores de velocidad similares en los

diferentes días de medición. En tanto que los adoquines fabricados de partículas sin lavar y agregado cal, presenta los valores más bajos de velocidad ultrasónica (Figura 4a).

Para la mezcla 60:40, se observa que los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar y agregado cal, presentan los valores de velocidad más similares a los adoquines fabricados sin partículas de madera. En cuanto a los adoquines fabricados con partículas de madera lavadas y sin lavar presentan los valores más bajos de velocidad ultrasónica, respectivamente (Figura 4b).

Así mismo, para la mezcla 70:30 se observa que cuando los adoquines fueron fabricados a partir de partículas sin lavar y lavadas, presentan valores de velocidad y un comportamiento similar en los diferentes días de medición. Por otra parte, los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar y agregado cal, muestran los valores más bajos de velocidad ultrasónica (Figura 4c).

Al mismo tiempo, se tiene que para la mezcla 80:20 cuando los adoquines son fabricados con partículas de madera sin lavar y sin lavar con cal, muestran valores de velocidad ultrasónica muy afines a través de los diferentes días de medición, mientras que los adoquines fabricados con partículas lavadas muestran valores de velocidad ultrasónica inferiores (Figura 4d).

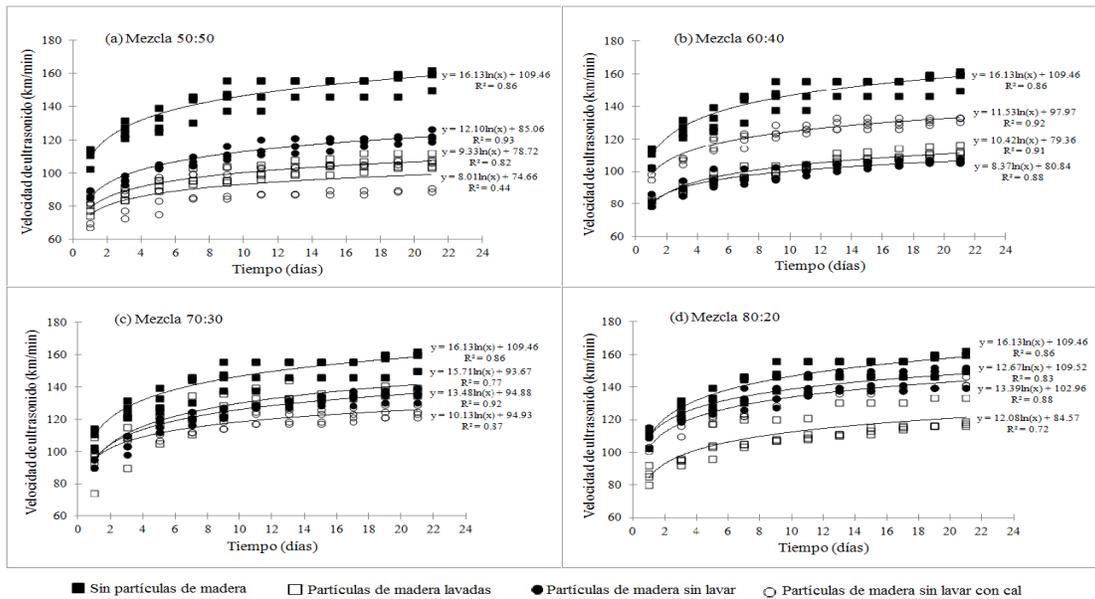


Figura 4. Velocidad de ultrasonido a través del tiempo para cuatro mezclas con diferentes proporciones en base a tres tratamientos aplicados.

La variación en densidad de las diferentes mezclas, se determinó a través del peso y volumen de los adoquines, la cual se muestra en la figura 5. En esta se puede observar que los adoquines fabricados sin partículas de madera son los que presentan la mayor densidad. Así mismo, se observa que el

valor de densidad en todas las mezclas va disminuyendo a través del tiempo, sin embargo, la variación de una medición a otra es muy poca por lo que se logra apreciar un comportamiento casi constante.

Al interpretar cada una de las proporciones en la mezcla 50:50, se observa que cuando los adoquines son fabricados con partículas de madera sin lavar, muestran una densidad mayor, respecto a los adoquines fabricados a partir de partículas lavadas y sin lavar con cal los cuales a su vez presentan valores de densidad muy similares en los diferentes días de medición (Figura 5a).

En el caso de la mezcla 60:40, se puede observar que los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar y agregado cal presentan mayores valores de densidad en comparación a los adoquines fabricados con partículas de madera lavadas y sin lavar, los cuales muestran valores de densidad muy similares entre sí (Figura 5b).

Por otra parte, en la mezcla 70:30 se observar que los adoquines elaborados a partir de partículas de madera lavadas, sin lavar y sin lavar con cal, presentan valores de densidad muy similares en los diferentes días de medición. No obstante, se puede notar que los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar son los que muestran los menores valores de densidad (Figura 5c).

En cuanto a la mezcla 80:20, se puede notar que tanto los adoquines fabricados con partículas de madera lavadas, sin lavar y sin lavar con cal, muestran valores de densidad muy similares entre sí en los diferentes días de medición. Sin embargo, se logra apreciar que los adoquines elaborados con partículas lavadas son los que muestran los menores valores de densidad (Figura 5d).

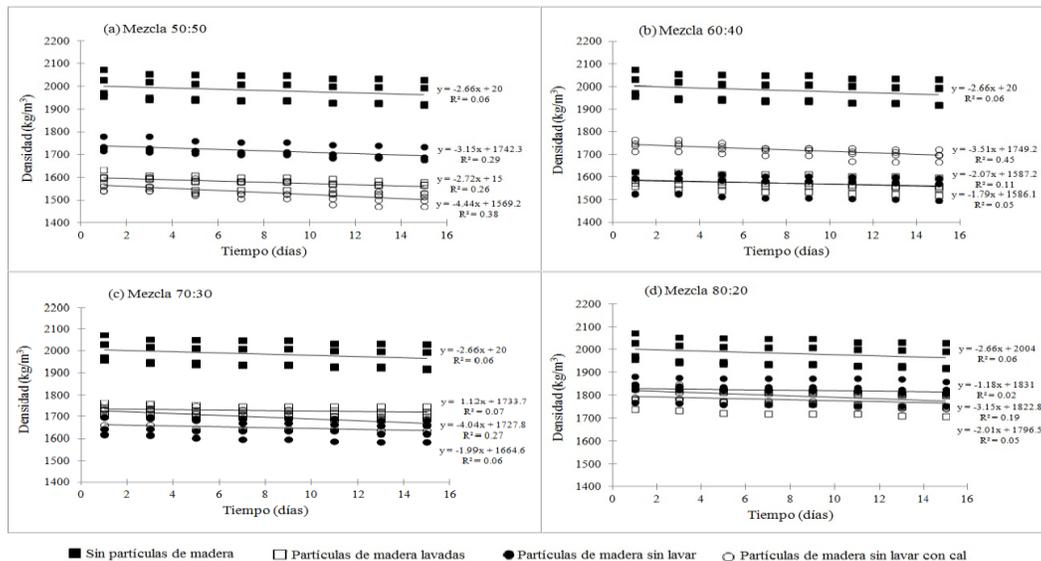


Figura 5. Densidad a través del tiempo para cuatro mezclas con diferentes proporciones en base a tres tratamientos aplicados.

La correlación entre la densidad y la velocidad de ultrasonido de las diferentes mezclas se muestra en la figura 6. En esta se puede observar que independientemente del tipo de mezcla y/o tratamiento de las partículas utilizado en la fabricación de adoquines, los valores no presentan una buena correlación.

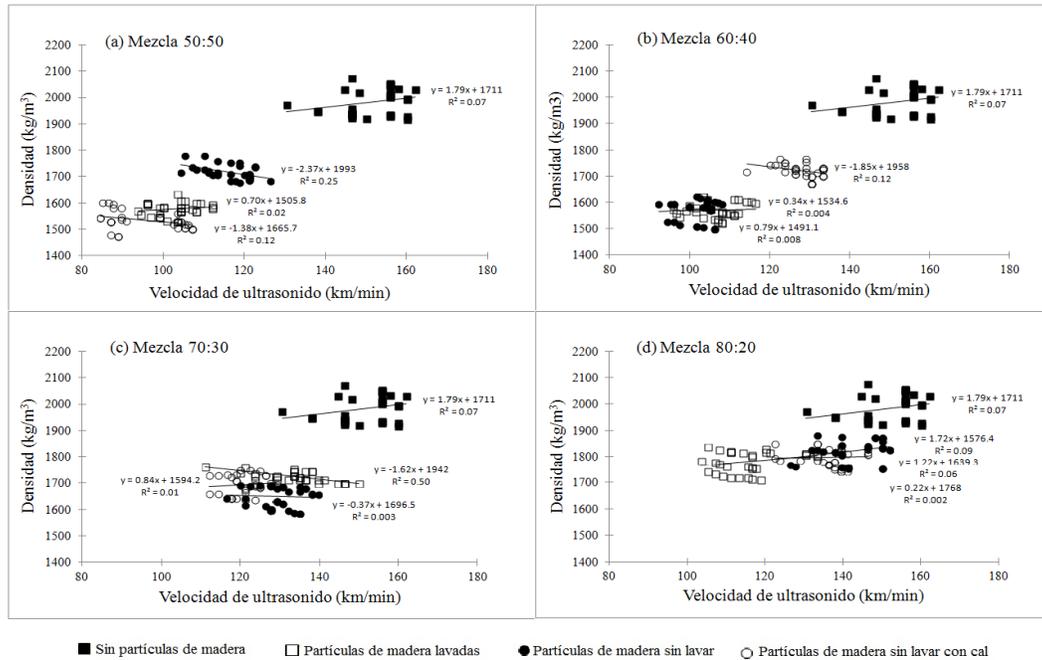


Figura 6. Correlación entre densidad y velocidad de ultrasonido para cuatro mezclas con diferentes proporciones en base a tres tratamientos aplicados.

Absorción de agua, módulo de ruptura en flexión y desgaste

En el ensayo de absorción de humedad (Figura 7a), se encontró que el valor disminuye al disminuir la cantidad de partículas de madera en los adoquines o al incrementar la proporción de arena y polvo de piedra. También se puede observar que la mezcla con proporciones 60:40 en los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar con cal, presenta diferencia significativa (para un $\alpha=0,01$) con los otros tratamiento (partículas de madera lavadas y sin lavar). Para el resto de las mezclas no presentan diferencias significativas entre tratamientos o mezclas.

En el caso del módulo de ruptura (Figura 7b), el comportamiento es irregular en las diferentes mezclas. Los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar y agregado cal, presentan una diferencia significativa en las mezclas con proporciones 50:50, 60:40 y 80:20, esto para un $\alpha=0,01$ (Figura 5b). En cuanto a las demás mezclas no se obtienen diferencias estadísticas significativas, excepto con la mezcla 80:20 (Figura 7b).

En el caso del ensayo de resistencia de abrasión (Figura 7c), también se presenta un comportamiento muy irregular entre las mezclas. Los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar, presentan poca diferencia entre las mezclas, siendo a su vez los que presentan los valores más bajos de desgaste, para las mezclas con proporciones de 60:40 y 70:30 determinado por la longitud de huella. Por el contrario, los adoquines fabricados con partículas de madera lavadas, son los que presentan los mayores valores de desgaste para las mezclas con proporciones 50:50, 70:30 y 80:20 (Figura 7c).

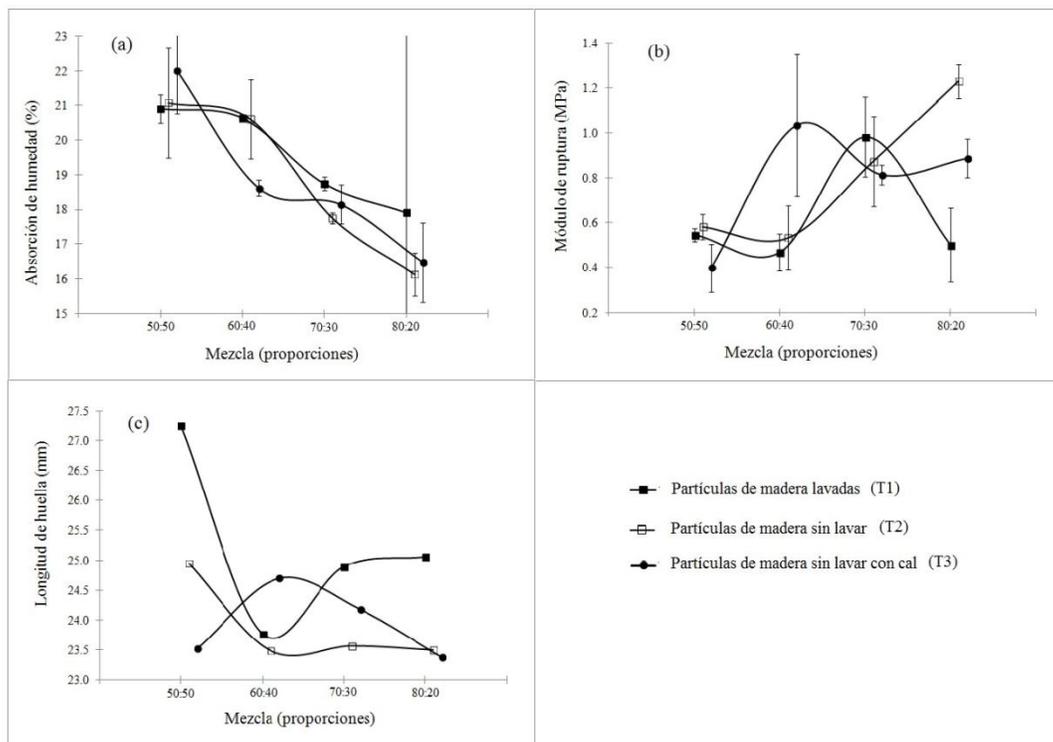


Figura 7. Comportamiento de los ensayos de absorción de humedad (a), módulo de ruptura (b) y resistencia a la abrasión (c) para las diferentes mezclas en sus diferentes proporciones, en base a los tratamientos aplicados a las partículas.

Ensayo acelerado de resistencia a la pudrición natural

En el ensayo acelerado de la resistencia al ataque de hongos (Cuadro 3) se encontró que no existe diferencia significativa ($\alpha=0,01$) entre las diferentes mezclas y tratamientos de las partículas. Un aspecto importante de destacar, es que las pérdidas de peso presentan valores negativos. Así mismo, se observa gran variabilidad en los valores de coeficientes de variación (CV). En el caso de uso del

hongo *Trametes versicolor* los valores son mayores. EL CV más bajo se obtuvo en los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar en la proporción de 70:30 y el CV más alto fue en los adoquines fabricados con partículas de madera lavadas en la mezcla de proporciones 50:50, ambos valores correspondientes a las muestras sometidas al ataque del hongo *Trametes versicolor*. En el caso del hongo *Lenzites acuta*, la variabilidad, medida con el CV fue de 14,25% a 51,30%, donde el valor más bajo corresponde a los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar con cal para la mezcla de proporciones 80:20, en tanto el valor más alto se presentó en los adoquines con partículas de madera sin lavar en la mezcla de proporciones de 50:50.

Cuadro 3. Porcentaje promedio de la pérdida de peso de los bloques de prueba bajo pudrición durante 16 semanas en base a dos tipos de hongos.

Tratamiento	Mezcla	<i>Trametes versicolor</i>	<i>Lenzites acuta</i>	
Patrón	100:0	-1,41 (13,25)* A	-1,57 (16,44) A	
	50:50	-0,78 (102,59) A	-1,70 (51,30) A	
	Partículas de madera lavadas (T1)	60:40	-1,59 (19,04) A	-1,71 (36,73) A
		70:30	-1,63 (16,51) A	-1,80 (34,76) A
		80:20	-1,69 (22,40) A	-1,66 (37,32) A
Partículas de madera sin lavar (T2)	50:50	-1,31 (28,22) A	-1,28 (49,64) A	
	60:40	-1,56 (10,23) A	-2,13 (15,66) A	
	70:30	-1,81 (9,32) A	-1,73 (35,52) A	
	80:20	-1,76 (16,03) A	-2,30 (22,38) A	
Partículas de madera sin lavar con cal (T3)	50:50	-1,34 (20,65) A	-1,69 (39,48) A	
	60:40	-1,13 (36,14) A	-1,95 (32,06) A	
	70:30	-1,46 (4,70) A	-1,67 (34,53) A	
	80:20	-1,78 (14,46) A	-2,03 (14,25) A	

*El valor entre paréntesis indica el coeficiente de variación de 10 muestras. Los valores con letras similares indican que no hay diferencia estadística significativa a un 99% de confianza.

Análisis de resultados

Caracterización del material utilizado

Los materiales utilizados en la fabricación de los adoquines presentan en su mayoría dimensiones menores a los 8 mm, con diferencias en las proporciones de tamaño de las partículas de acuerdo al tipo de material (Figura 3). El tamaño de las partículas afecta las propiedades mecánicas de los productos fabricados, además de las condiciones del proceso y las proporciones cemento-madera utilizadas (Carrion *et al.*, 2008, Nazerian y Sadeghiipannah, 2013). Por ejemplo, el utilizar partículas con pequeñas dimensiones hace que se presenten índices de inhibición del fraguado de mayor magnitud en comparación con las mezclas elaboradas con partículas de mayor dimensión, lo que se puede atribuir a una rápida migración de las sustancias extraíbles a la superficie de las partículas (Carrion *et al.*, 2008).

En el presente producto, el tamaño de partículas de madera y de polvo de piedra utilizados en la fabricación de adoquines presenta sus mayores porcentajes entre las dimensiones de 6,7 mm a 4,0 mm y de 3,35 mm a 2 mm (Figura 3). En tanto la arena, presenta los mayores porcentajes de material en las dimensiones de 3,35 mm a 2 mm y de 1 mm a 0,25 mm, esto al ser un material con partículas más finas. El contar con partículas vegetales, como en este caso las de madera, con una geometría alargada en la fabricación de compuestos madera-cemento, permite obtener una mayor estabilidad del producto (Beraldo, 2011).

Endurecimiento y densidad

El aumento de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en el tiempo, principalmente hasta el día nueve (Figura 4), es normal para este tipo de producto. Los cambios más significativos en la VPU se obtienen durante las primeras semanas de fabricado del producto; luego, los valores comienzan a estabilizarse (Beraldo y Balzam, 2009). Dicho aumento se debe al proceso de fraguado y endurecimiento del cemento (Beraldo y Martins, 2007).

Por otra parte, Beraldo y Martins (2007), establecen que a un mayor contenido de partículas de madera, disminuye la VPU, esto porque hay mayor discontinuidad en la composición de la estructura, evitando una adecuada propagación de las ondas. Lo que es posible comprobar en este estudio, ya que los adoquines fabricados con partículas de madera lavadas, sin lavar y sin lavar con cal en la mezcla de proporciones 50:50 presenta los valores más bajos de VPU y coeficientes de

determinación (Figura 4a), en comparación con los encontrados para esos mismos tratamientos pero con proporciones de 80:20, que presentan valores superiores (Figura 4d).

Altos valores de VPU, entre un rango de 90 y 120 km/min, son un buen indicador del grado de compatibilidad entre la madera y el cemento (Beraldo y Balzam, 2009). En este estudio, se encontró que los valores promedio de VPU obtenidos en el último día de medición para las mezclas en todos los tratamientos aplicados (Figura 4), superan el valor mínimo del rango indicado anteriormente, por lo que hay una buena compatibilidad entre el cemento y las partículas de *Pinus sp.*, usadas en este estudio. Así mismo, con el fin de mejorar los valores de VPU a valores próximos o superiores a 120 km/min, es necesario el adicionar aceleradores o aditivos, como por ejemplo cloruro de calcio (CaCl_2), a las partículas de madera con la finalidad de favorecer el endurecimiento de la mezcla (Nazerian y Sadeghiipahan, 2013).

En relación a los valores de densidad encontrados en el presente estudio, de 1473 a 2073 kg/m^3 (Figura 5), se encuentra que son superiores a los valores de densidad reportados por Karade (2010), quién indica valores de densidad entre 920-1250 kg/m^3 para productos de hormigón fabricados a partir de residuos de madera de construcción en Japón.

La disminución de la densidad con el tiempo (Figura 5), ocurre por la pérdida peso de los adoquines debido a la evaporación de la humedad durante el proceso de secado (Cabezas, 2014). También, se evidencia la disminución de la densidad con el incremento de la cantidad de partículas de madera, como lo establece Torkaman *et al.* (2014). Por ejemplo, los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar con cal para las mezcla con proporciones 50:50 presenta una densidad promedio (1505 kg/m^3) menor que los adoquines fabricados con las proporciones de 60:40 (densidad promedio de 1699 kg/m^3). La disminución de la densidad en las altas proporciones es debido a la sustitución de arena y polvo de piedra por las partículas de madera, las cuales son de menor densidad (Leng *et al.*, 2011).

Un punto importante de destacar, es que independientemente de las mezclas o tratamientos de las partículas, los valores de VPU no presentan una buena correlación con la densidad (Figura 6). Debido a esto, se puede señalar que los valores de velocidad ultrasónica no pueden ser utilizados para predecir la densidad del adoquín. No obstante, dichos valores de velocidad ultrasónica permiten medir el tiempo de curado de los adoquines (Figura 4).

Absorción de agua, módulo de ruptura en flexión y desgaste

La absorción de humedad aumenta conforme incrementa la cantidad de partículas de madera en el adoquín (Figura 7a). Este comportamiento se explica por el hecho de que la madera va a representar espacios vacíos y al ser un material higroscópico le permite absorber o liberar agua dependiendo las condiciones en las que esta se encuentre (de Roma, 2001). Sin embargo, la absorción de humedad se puede controlar mediante la impregnación de la pared celular de los materiales lignocelulósicos con polímeros solubles en agua (Karade, 2010, Stancato *et al.*, 2005). En la figura (7a), se logra apreciar que al agregar cal en la partículas de madera solo en la mezcla con proporciones de 60:40, se logró obtener una disminución en el porcentaje de absorción de humedad respecto a los otros tratamientos, por lo que se puede inferir que en este estudio el adicionar cal a las partículas de madera no representa una disminución en la absorción de agua en el adoquín.

Para el caso del módulo de ruptura, los resultados obtenidos presentan un comportamiento irregular, pero se evidencia un ligera disminución con el incremento de las partículas de madera (Figura 7b). La mezcla que más evidenció la disminución de la densidad en relación con la proporción de madera utilizada fueron los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar. Esta disminución es atribuida a una reducción en la resistencia a la flexión del producto final, debido a la presencia de extractivos en las fibras (Nazerian y Sadeghiipannah, 2013), que pueden interferir en el proceso de hidratación del cemento (Viera y Ayala, 2006).

La adición de cal en las mezclas y las partículas lavadas mejora el módulo de ruptura (Figura 7b). La adición de aceleradores como calcio, magnesio o silicio contrarrestan los efectos adversos de los materiales en la hidratación del cemento (Karade, 2010). Estos componentes minerales pueden penetrar en la pared celular de las partículas de madera, induciendo a mejorar las fuerzas adhesivas entre la madera y el cemento (Nazerian y Sadeghiipannah, 2013). Sin embargo, no en todos los casos ocurre esto, por ejemplo los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar con cal respecto a los adoquines fabricados con partículas de madera lavadas y sin lavar esto no se cumple para las mezclas con proporciones de 50:50, 70:30 y 80:20 (Figura 7b). En este caso, estas variaciones pueden ser explicadas a que este tipo de aditivo no es el adecuado para la mezcla.

Finalmente, los resultados obtenidos de la resistencia a la abrasión también son muy irregulares, fluctúan entre los 21,22 mm y 27,25 mm de longitud de huella (Figura 7c). No obstante, las mezclas con proporciones de 60:40 y 70:30 para los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar, presentan los valores más bajos de longitud de huella con valores de 23,49 mm y 23,57 mm respectivamente, lo que indica una mayor resistencia al desgaste (Figura 7c). Acorde con la

norma de INTE 06-02-15-07, INTECO (2006), es aceptable cuando se obtienen valores de longitud de huella entre un rango de 19 a 24 mm, por el contrario se rechazan resultados fuera de este rango, ya que valores de longitud de huella superiores a 24 mm indican que el adoquín se desgasta muy fácilmente y valores inferiores a 19 mm indican que el adoquín es demasiado rígido. Acorde con los resultados obtenidos y los rangos establecidos por la norma, se tiene que los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar, son los que presentan una mayor aceptación para todas las mezclas, excepto para la mezcla con proporciones de 50:50, esto en comparación a los demás tratamientos. No obstante, para mejorar la resistencia al desgaste es necesario aumentar el endurecimiento o edad del adoquín (Siddique y Khatib, 2010).

Ensayo acelerado de resistencia a la pudrición natural

En el ensayo acelerado de resistencia a la ataque de hongos, los valores negativos obtenidos (Cuadro 3), indican que las muestras aumentan de peso, por lo que los compuestos no presentan ataque significativo de los hongos, por lo que se clasifica como “altamente resistente” ante los hongos *Trametes versicolor* y *Lenzites acuta* acorde a norma ASTM 2017. Dicho resultado concuerda con Okino *et al.* (2005) y Okino *et al.* (2004), quienes indican que, en compuestos de madera-cemento no hay degradación medible de la madera (pérdida de peso) y que el micelio no logra cubrir completamente la superficie de las muestras. Por otro lado, Papadopoulos (2008), reporta que los hongos no logran atacar el compuesto de cemento con partículas de maple en condiciones de servidumbre y encontró un aumento de peso de 5% en masa, al igual que el presente estudio. Dicho autor justificó el aumento del peso en el compuesto a una carbonatación del cemento (Papadopoulos, 2008). Acorde con los resultados en este estudio y los presentados por Okino *et al.* (2005), Okino *et al.* (2004) y Papadopoulos (2008), se indica que estos compuestos son técnicamente adecuados para uso en exteriores, donde están presentes tanto la humedad como las condiciones favorables para el desarrollo de hongos.

Conclusiones

1. La evaluación de la variación de la densidad y la velocidad ultrasónica mostró una variación de 1473 a 2073 kg/m³ y de 98 a 158 km/min, respectivamente. Los compuestos con partículas de madera sin lavar y sin lavar con cal, presentan los mejores resultados de densidad y endurecimiento, con valores muy similares entre sí. Por otro lado, el endurecimiento de los adoquines se logra aproximadamente en los nueve días luego de su fabricación.
2. Los ensayos de absorción de humedad y módulo de ruptura mostraron una variación de 15 a 22% y de 0,40 a 1,23 MPa, respectivamente. Los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar (T2) y sin lavar con cal (T3) son los que presentan los mejores resultados, con valores muy similares entre sí. Sin embargo, no se cumple con las normas establecidas por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). No obstante, se pueden hacer mejoras en las mezclas para cumplir dichos estándares.
3. La evaluación del ensayo de abrasión mostró una variación en la longitud de huella entre 21,22 a 27,25 mm. Los adoquines fabricados con partículas de madera sin lavar (T2) presentan los mejores valores de aceptación de acuerdo a la norma establecida por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO).
4. El ensayo acelerado de resistencia a la pudrición mostró una variación de masa de -0,78 g a -1,81 g para *Trametes versicolor* y de -1,28 g a -2,30 g para *Lenzites acuta*, lo que indica un grado de resistencia a estos hongos catalogada como “altamente resistente” para todas las mezclas y tratamientos evaluados.
5. Los resultados indican que la mezcla con proporciones de 60:40 para los adoquines con partículas de madera sin lavar y agregando cal (T3), es una de las que presenta un buen comportamiento en todos los parámetros evaluados.

Ficha técnica



Adoquín Hexagonal

Adoquín compuesto de concreto-madera de 8 cm de espesor



DESCRIPCIÓN

Los adoquines compuestos de concreto-madera son un elemento arquitectónico destinado a servir de pavimentos flexibles con gran durabilidad, belleza y colorido, que pueden utilizarse después de colocados.

VENTAJAS

- Producto eco amigable e innovador.
- Utilización de residuos de madera.
- Atractivo, variedad de colores.
- Diseño poco comercializado.
- Permite la filtración del agua.
- Contribuye a la carbono neutralidad.
- Fácil y rápido de instalar.
- Es antideslizante.

USOS

Adocretin tiene gran variedad de usos, como para tránsito peatonal en parques, aceras, senderos, terrazas, ciclo vías, entre otros tipos de superficies que requieran un acabado de calidad y gran belleza escénica.

INSTALACIÓN

Los adoquines deben ser colocados sobre una base debidamente preparada. Se requiere conformar una cama de arena nivelada con un espesor de aproximadamente de 4 cm en la parte superior donde se colocarán los adoquines en el entramado seleccionado.

Las juntas se deberán de rellenar con partículas de madera muy finas. Es necesario compactar los adoquines instalados luego de haber colocado el sello de arena de las juntas.

DATOS TÉCNICOS

Normas aplicadas:

INTE 06-02-14-06
INTE 06-02-15-07
INTE 06-02-13 (ASTM C140)
ASTM designación D-2017-81

Tolerancias:

Longitud: ± 2 mm
Espesor: ± 3 mm

Resultados de las normas aplicadas:

Valores obtenidos para los adoquines según mezcla de proporciones 60% partículas de cemento, arena, polvo de piedra y 40% partículas de madera.

Absorción de agua:

Absorción mínimo promedio: 18,61% a 28 días.
Valor mínimo individual: 18,17% a 28 días.

Módulo de Ruptura (Flexión):

Resistencia mínima promedio: 1,03 MPa a 28 días.
Valor mínimo Individual: 0,91 MPa a 28 días.

Resistencia a la abrasión:

Longitud de huella promedio: 24,70 mm a 28 días.

Resistencia a la pudrición natural:

“Altamente resistente”

PRESENTACIÓN

Piezas de 11,5 cm de lado y de 8 cm de espesor.
Peso aproximado: 4,73 kg.
Piezas por metro cuadrado: 29.
Empaque: Tarimas de 100 piezas.
Colores: Gris y otros colores en contra pedido.

Referencias

- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2003). Standard method of accelerated laboratory test of natural decay resistance of woods. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.10., Philadelphia. USA. (ASTM D 2017-81 Reproved 1994).
- Asghari Mooneghi, M.; Irwin, P.; Gan Chowdhury, A. (2014). Large-scale testing on wind uplift of roof pavers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 128, 22-36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2014.03.001>.
- Ashori, A.; Tabarsa, T.; Amosi, F. (2012a). Evaluation of using waste timber railway sleepers in wood–cement composite materials. *Construction and Building Materials*, 27(1), 126-129. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.016>.
- Ashori, A.; Tabarsa, T.; Sepahvand, S. (2012b). Cement-bonded composite boards made from poplar strands. *Construction and Building Materials*, 26(1), 131-134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.001>.
- Barrantes Rodríguez, A.; Ugalde Alfaro, S. (2013). Usos y aportes de la madera en Costa Rica: Estadísticas 2012. Oficina Nacional Forestal (Costa Rica), 30p.
- Beraldo, A. L.; Martins, S. C. F. (2007). Destructive and non-destructive evaluation of bamboo chips-Portland cement composite. *Agricultural Engineering College, Campinas University Campinas, SP, Brazil*, 1 (6), 13p.
- Beraldo, A. L.; Balzam, H. (2009). Compuestos no-estructurales de cementos comerciales y aserrín de maderas Argentinas. *Maderas, Ciencia y tecnología*, 11(3), 233-250. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2009000300006>.
- Beraldo, A. L. (2011). Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción. 1ª ed. Valencia, España, Universidad Politécnica de València, 301-326.
- Buehlmann, U.; Bumgardner, M.; Fluharty, T. (2009). Ban on landfilling of wooden pallets in North Carolina: an assessment of recycling and industry capacity. *Journal of cleaner production*, 17(2), 271-275. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.002>.

- Cabezas Fierro, M. I. (2014). Elaboración de un manual de procesos constructivos del adoquinado (*Tesis Doctoral*, QUITO/EPN/2014).
- Carrion, J. M. P.; Rodríguez, J. G. H.; Rodríguez, R.; Anda, J. A. S. G.; Talavera, F. J. F. (2008). Determinación de la Compatibilidad de Mezclas de Aserrín de Pinus spp y Cemento Portland para la Potencial Manufactura de Tableros Cemento-Madera. *Avances en la investigación científica en el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA), Universidad de Guadalajara*.
- Cheumani, Y. A. M.; Ndikontar, M.; De Jéso, B.; Sébe, G. (2011). Probing of wood–cement interactions during hydration of wood–cement composites by proton low-field NMR relaxometry. *Journal of materials science*, 46(5), 1167-1175. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-010-4888-3>.
- de Roma, A. L. (2001). La madera: estructura, composición química y causas de deterioro. Cursos sobre el patrimonio histórico: Actas de los XI Cursos Monográficos sobre el Patrimonio Histórico, Reinoso, julio 2000, 5, 115.
- Fontaneda, L. Á. S. (2014). The analysis of rainwater infiltration into permeable pavements, with concrete blocks and porous mixtures, for the source control of flooding (*Tesis Doctoral*, Universidad de Cantabria).
- INTECO (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica). (2006). Adoquines de concreto para pavimentos-Especificaciones, 11p.
- Karade, S. R. (2010). Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. *Construction and building materials*, 24(8), 1323-1330. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.003>
- Khorsandnia, N.; Valipour, H. R.; Crews, K. (2012). Experimental and analytical investigation of short-term behaviour of LVL–concrete composite connections and beams. *Construction and Building Materials*, 37, 229-238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.022>.
- Leng, Z.; Al-Qadi, I. L.; Lahouar, S. (2011). Development and validation for in situ asphalt mixture density prediction models. *NDT & E International*, 44(4), 369-375. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.03.002>.

- Máas Díaz A. De la L. (2012). Desarrollo de elementos modulares utilizando materiales alternativos con aplicaciones al diseño. (*Tesis de Ingeniería en diseño, Universidad del Papaloapan*), 72p.
- Mymrin, V.; Meyer, S. A. S.; Alekseev, K. P.; Pawlowsky, U.; Fernandes, L. H.; Scremim, C. B.; Catai, R. E. (2014). Manufacture of a construction material using the physicochemical properties of ash and sludge wastes from MDF board production. *Construction and Building Materials*, 50, 184-189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.016>.
- Nasser, R. A.; Al-Mefarrej, H. A.; Abdel-Aal, M. A.; Alshahrani, T. S. (2014). Effects of tree species and wood particle size on the properties of cement-bonded particleboard manufacturing from tree prunings. *Journal of Environmental Biology*, 35(5).
- Nazerian, M.; Sadeghiipannah, V. (2013). Cement-bonded particleboard with a mixture of wheat straw and poplar wood. *Journal of Forestry Research*, 24(2), 381-390. <http://dx.doi.org/10.1007/s11676-013-0363-8>
- Okino, E. Y.; Souza, M. R. D.; Santana, M. A.; Alves, M. V. D. S.; Sousa, M. E. D.; Teixeira, D. E. (2004). Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. *Cement and Concrete Composites*, 26(6), 729-734. [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00061-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00061-1)
- Okino, E. Y.; de Souza, M. R.; Santana, M. A.; Alves, M. V. D. S.; de Sousa, M. E.; Teixeira, D. E. (2005). Physico-mechanical properties and decay resistance of Cupressus spp. cement-bonded particleboards. *Cement and Concrete Composites*, 27(3), 333-338. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.046>.
- Papadopoulos, A. N. (2008). Performance of cement bonded boards made from maple particles. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 66(5), 385-387. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-008-0260-6>.
- Park, D. G.; Sandoval, N.; Lin, W.; Kim, H.; Cho, Y. H. (2014). A case study: Evaluation of water storage capacity in permeable block pavement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(2), 514-520. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-014-0036-y>.

- Serrano Guzmán, M.F.; Pérez Ruíz, D.D. (2011). Concreto preparado con residuos industriales: resultado de alianza empresa universidad. *Revista Educación en Ingeniería*, (6) 11, 1-11.
- Serrano Montero, R.; Moya Roque, R. (2011). Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* (Costa Rica), 8 (21), 12p.
- Siddique, R.; Khatib, J. M. (2010). Abrasion resistance and mechanical properties of high-volume fly ash concrete. *Materials and Structures*, 43(5), 709-718. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-009-9523-x>.
- Stancato, A. C.; Burke, A. K.; Beraldo, A. L. (2005). Mechanism of a vegetable waste composite with polymer-modified cement (VWCPMC). *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 599-603. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.011>.
- Tabarsa, T.; Ashori, A. (2011). Dimensional Stability and Water Uptake Properties of Cement-Bonded Wood Composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 19(2), 518-521. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-011-0295-3>.
- Taoukil, D.; Sick, F.; Mimet, A.; Ezbakhe, H.; Ajzoul, T. (2013). Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite. *Construction and Building Materials*, 48, 104-115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.067>.
- Tittlein, P.; Cloutier, A.; Bissonnette, B. (2012). Design of a low-density wood–cement particleboard for interior wall finish. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 218-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.020>.
- Torkaman, J.; Ashori, A.; Sadr Momtazi, A. (2014). Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 50, 432-436. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.044>.
- Vergara González, E.; Vergara González, D.; Corral Bovadilla, M.; Nájera Hernández, P.; Otaño Jiménez, L.(2013).Evaluation of cement-wood bonding consistency, one way to improve the mechanical properties of novel composites. *International Congress on Project Management and Engineering*, 1634-1643.

Viera, D. V.; Ayala, K. M. (2006). Efecto de la relación madera-cemento sobre la compatibilidad de la madera con el aglutinante. *Revista Forestal Baracoa*, 25 (2), 87-91.