



Concreto compactado con rodillo como alternativa de pavimentación para la red vial de Portoviejo

Roller compacted concrete as an alternative to paving for the Portoviejo road network

O betão compactado a rolo como alternativa de pavimentação para a rede viária de Portoviejo

Luis Antonio Castro-Vélez ^I

luancastro@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-3534-8422>

Reynier Moll-Martínez ^{II}

reymoll80@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6678-0017>

Correspondencia: reymoll80@gmail.com

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 29 de junio de 2024 * **Aceptado:** 26 de julio de 2024 * **Publicado:** 02 de agosto de 2024

I. Investigador Independiente, Ecuador.

II. Investigador Independiente, Ecuador.

Resumen

El concreto compactado con rodillo (CCR) se propone como una alternativa viable para la pavimentación de la red vial de Portoviejo, aprovechando sus ventajas en costo y durabilidad. El objetivo principal es determinar los parámetros de diseño de mezclas utilizando materiales locales y establecer lineamientos para el diseño estructural y procesos constructivos del CCR. Fue necesario diseñar mezclas con sus parámetros correspondientes, analizar el comportamiento del CCR en estado fresco y endurecido. El estudio sigue un enfoque cuantitativo con un diseño experimental y una investigación de campo descriptiva. Los resultados preliminares indican que las mezclas de CCR diseñadas cumplen con los requisitos de resistencia y durabilidad, mostrando un buen comportamiento tanto en estado fresco como endurecido, y resistiendo adecuadamente las condiciones ambientales y de tráfico de la región. En conclusión, el CCR es una opción efectiva para mejorar la infraestructura vial de Portoviejo, proporcionando beneficios económicos y una base sólida para futuras implementaciones, apoyada por lineamientos claros para el diseño y la construcción.

Palabras clave: Pavimentación; Red vial; Proceso constructivo; Durabilidad; Diseño de mezclas.

Abstract

Roller compacted concrete (RCC) is proposed as a viable alternative for paving the road network of Portoviejo, taking advantage of its advantages in cost and durability. The main objective is to determine the parameters of mix design using local materials and to establish guidelines for the structural design and construction processes of RCC. It was necessary to design mixes with their corresponding parameters, to analyze the behavior of RCC in fresh and hardened state. The study follows a quantitative approach with an experimental design and a descriptive field investigation. The preliminary results indicate that the designed RCC mixes meet the strength and durability requirements, showing good behavior both in fresh and hardened state, and adequately resisting the environmental and traffic conditions of the region. In conclusion, RCC is an effective option to improve the road infrastructure of Portoviejo, providing economic benefits and a solid base for future implementations, supported by clear guidelines for design and construction.

Keywords: Paving; Road network; Construction process; Durability; Mixture design.

Resumo

O betão compactado com rolo (CCR) é proposto como uma alternativa viável para a pavimentação da rede viária de Portoviejo, aproveitando as suas vantagens em termos de custo e durabilidade. O principal objetivo é determinar os parâmetros de projeto de misturas utilizando materiais locais e estabelecer diretrizes para o projeto estrutural e processos de construção do CCR. Foi necessário projetar misturas com os seus correspondentes parâmetros, analisar o comportamento do CCR no estado fresco e endurecido. O estudo segue uma abordagem quantitativa com desenho experimental e pesquisa de campo descritiva. Os resultados preliminares indicam que as misturas de CCR projectadas cumprem os requisitos de resistência e durabilidade, apresentando um bom comportamento tanto no estado fresco como no estado endurecido, e resistindo adequadamente às condições ambientais e de tráfego da região. Concluindo, o CCR é uma opção eficaz para melhorar a infra-estrutura rodoviária de Portoviejo, proporcionando benefícios económicos e uma base sólida para implementações futuras, apoiada por diretrizes claras para o projecto e construção.

Palavras-chave: Pavimentação; Rede rodoviária; Processo construtivo; Durabilidade; Projeto de mistura.

Introducción

El Concreto Compactado con Rodillo (CCR), es una mezcla de concreto de cemento portland de cero revestimientos, su espesor comprende capas menores a 25 cm de espesor compactado (Carrillo y Orellaba 2003). Es un concreto con contenido de agua bajo que exige para su colocación una energía de compactación alta similar a la que dan los equipos de rodillos lisos sin vibración, además de ser una excelente alternativa de pavimentación. Esta técnica de pavimentación pretende eliminar las desventajas que tradicionalmente se otorga a los pavimentos de concreto convencional, las cuales son la apertura inmediata al tráfico y el costo por m³ de concreto es más bajo, por poseer una cantidad considerablemente menor de cemento y con resistencias mucho mayores que el concreto convencional.

El CCR es una alternativa en la cual no es requerida la compra de maquinaria y equipo de última tecnología para su colocación, tales como reglas vibratorias que varían según las dimensiones de la vía entre otros factores o máquinas de molde deslizante para concreto vibrado, sino que utiliza básicamente una pavimentadora con una regla modificada. Cabe mencionar que esta tecnología de pavimentación tiene como objetivo eliminar las deficiencias que tradicionalmente se la ha dado a

los pavimentos de hormigón convencionales; es decir, los costos inmediatos de tránsito y construcción, porque la mezcla CCP se puede abrir de inmediato, y el costo es menor por metro cúbico de hormigón, debido a que es diferente al tradicional comparado con el hormigón, utiliza mucho menos cemento y tiene una resistencia mucho mayor.

Antiguamente se pensaba en los pavimentos asfálticos por su bajo costo inicial, convirtiéndolos en la primera opción en los proyectos de infraestructura vial; no obstante, el costo aumenta grandemente a través del tiempo debido a los mantenimientos constantes que se le deben proporcionar, siendo ésta una de sus mayores desventajas frente al mínimo mantenimiento de los pavimentos de concreto hidráulico. Además, dado al auge de construcción de carreteras que existe actualmente en nuestro país, la técnica de CCR tiende a ser una de opción probablemente utilizable (Alvarado et al., 1967).

Con el paso del tiempo, en la ingeniería civil especialmente en el campo de las carreteras, se ha hecho necesario buscar soluciones alternativas al problema de la circulación de vehículos en la vía, lo que, en muchos de los casos, limita el desarrollo económico y social y a una mayor rentabilidad principalmente en países en vías de desarrollo, en donde el factor económico es de suma importancia a la hora de elegir entre una alternativa de pavimento flexible o rígido.

Alvarado, Díaz y Somoza (1967) en su estudio determinó que, el estudio de nuevas técnicas de pavimentación ofrece mayores beneficios que las técnicas tradicionales, ante la cual se propone la utilización de los pavimentos de concreto compactado con pavimentación que proporcional una serie de beneficios, para el ámbito técnico, constructivo y económico.

Carrillo y Orellaba (2003) con base a la información obtenida del uso del CCR y su empleo en la construcción de pavimentos, así como de la comparación de esta tecnología con otras alternativas de pavimentos comúnmente utilizadas, permiten indicar que, el diseño de la mezcla para CCR de una de las etapas fundamentales para lograr una adecuada capa al construir, debido a que las características de trabajabilidad de la mezcla inciden en la efectividad del equipo de construcción que se utilice. Además, está la construcción de una capa de CCR es congruentemente rápida, sin embargo, depende en gran medida del rendimiento de la planta que genera la mezcla, además de los conocimientos y experiencia de los obreros.

Para Moscoso y Tunque (2013) el CCR es en un material aceptado para la construcción y la rehabilitación de pavimentos. Esta tecnología proporciona un método económico de rápida construcción, con principios similares al suelo-cemento y otras construcciones de tierra. La mezcla

de concreto compactado con rodillo, es considerado como agregado enriquecido con cemento, compactado a su máxima densidad. La densidad del CCR es determinada para al menos cuatro diferentes contenidos de humedad usando ensayos de compactación de laboratorio (Proctor modificado).

Este hecho junto con una construcción no complicada, unas reducidas exigencias en cuanto mano de obra y unos ritmos de construcción elevados, se traduce en importantes economías en comparación con otras alternativas. Ante tal situación, se desarrollará un análisis comparativo de las distintos parámetros de resistencia (Resistencia a la Compresión, Módulo de Ruptura y Módulo de Elasticidad), de diversas mezclas de concreto diseñadas para pavimentos compactados con pavimentadora elaboradas con agregados y cemento nacionales que servirá de guía en la aplicación de esta técnica bajo las condiciones ambientales y de materiales existentes en el país, para la formulación de especificaciones locales para un proyecto específico, es decir, especificaciones en base a materiales, cargas vehiculares y otros aspectos de nuestro medio.

El estado actual de algunas calles del cantón Portoviejo requieren ser rehabilitadas y reconstruidas, debido a que se encuentran en un crítico estado, con deterioro de su capa de rodadura incluso con afectación del suelo por la gran cantidad de baches que cada día aumentan por falta de mantenimiento, muchas de estas se han producido por roturas de tuberías de agua potable y de alcantarillado, por consiguiente se requiere de la construcción de la estructura del pavimento en sus diferentes capas.

La proporción de pavimentos de concreto hidráulico existentes en el Ecuador y en Portoviejo comparada con la de pavimentos asfálticos es mínima, sin embargo, las ventajas proporcionadas por este tipo de pavimentos lo convierten en una necesidad para países con condiciones climáticas desfavorables y con bajo presupuesto para mantenimiento. Por ello, es necesario aplicar tecnología y métodos constructivos para mejorar las condiciones imperantes en estos caminos, por lo que se realizó un relevamiento técnico de concreto compactado de pavimento (CCP) como posible alternativa de pavimentación (Alvarado, Díaz y Somoza 1967). El nombre se debe a que presenta un concreto de baja humedad que requiere energía de compactación de alta presión para su vertido, similar al concreto que brindan los equipos con rodillos lisos y sin vibraciones.

Por las razones expuestas, se desarrolló el presente estudio debido a que, las calles se encuentran con un desgaste de la capa de rodadura y en algunos casos, se evidencian daños en la estructura del pavimento que ameritan ser reconstruidas o reparadas con material concreto compactado con

rodillo como alternativa de pavimentación para la red vial de Portoviejo. Para ello, se recopiló información de una serie de investigaciones actualizadas que describen algunos antecedentes del uso de los pavimentos de concreto compactado con pavimentadora, con el propósito de fundamentar bases que acrediten la necesidad de ejecutar un estudio de la realización de este tipo de pavimento, aplicando materiales y parámetros de diseño utilizados en el país.

El presente trabajo de fin de máster es una propuesta concreta compactado con rodillo como alternativa de pavimentación para la red vial de Portoviejo y tendría como objetivo principal Determinar los parámetros para el diseño de mezclas, utilizando materiales locales, así como también, proponer lineamientos generales del diseño estructural y proceso constructivos de los Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillo (CCR).

Metodología

El estudio siguió un enfoque cuantitativo con un diseño experimental y una investigación de campo descriptiva. La metodología se estructuró en varias fases para evaluar la viabilidad del concreto compactado con rodillo (CCR) como alternativa de pavimentación para la red vial de Portoviejo.

El enfoque de esta investigación fue cuantitativo, pues se realizaron ensayos técnicos de concreto compactado con rodillo. El método utilizado fue inductivo, permitiendo obtener conclusiones precisas a través del razonamiento. Según Fernández y Baptista (2018) este enfoque se caracteriza por el uso de datos numéricos, análisis estadístico y la representatividad de resultados.

El diseño de la investigación fue experimental, manipulando variables independientes para observar sus efectos en variables dependientes bajo condiciones controladas, como también lo describen Fernández y Baptista (2018). La investigación es descriptiva y de campo, debido a que, se estudian situaciones reales en las que el investigador manipula variables independientes. La investigación descriptiva busca caracterizar hechos, fenómenos, individuos o grupos para establecer su estructura o comportamiento.

Los resultados de este tipo de investigación proporcionan un conocimiento de profundidad intermedia (Hernández et al. 2016). En este contexto, se recopilará información bibliográfica sobre el concreto compactado con rodillo como alternativa de pavimentación para la red vial.

En esta investigación, se emplearán varias técnicas, como ensayos técnicos, observación, procesamiento y análisis de datos. Para obtener resultados teóricos y técnicos confiables, se utilizarán diversos equipos de laboratorio, así como dos programas informáticos: Microsoft Word,

para la redacción y presentación de los resultados teóricos, y Microsoft Excel, para tabular y sintetizar los datos de los ensayos técnicos. Estas herramientas permitirán presentar resultados claros y óptimos.

La población fueron todas las secciones de la red vial de Portoviejo que podrían beneficiarse del uso de concreto compactado con rodillo como método de pavimentación.

La muestra incluyó una selección representativa de estas secciones viales que fueron objeto de estudio y análisis. Estas secciones fueron elegidas considerando factores como el tráfico vehicular, el estado actual de las vías, y su ubicación geográfica dentro de la ciudad para asegurar la representatividad de los resultados obtenidos.

Resultados

Para el análisis de los resultados obtenidos en la evaluación del concreto compactado con rodillo como alternativa de pavimentación para la red vial de Portoviejo, se presentan a continuación los resultados de varios ensayos realizados sobre los materiales utilizados. Estos ensayos incluyen la determinación del contenido de humedad y la granulometría del agregado grueso y fino, así como la gravedad específica, absorción y densidad relativa de ambos tipos de agregados. Además, se incluye el diseño de mezclas de concreto, proporcionando una base sólida para evaluar la viabilidad y desempeño de esta técnica de pavimentación.:

Agregado grueso

Para la caracterización del agregado grueso utilizado en el diseño de mezcla, se adquirió material de la cantera MEGAROCK, ubicada en Portoviejo. Este material cumple con las normativas ASTM C 33 e INEN 872. Se realizó el ensayo de contenido de humedad evaporable del agregado grueso seleccionado, siguiendo la Norma ASTM C566-19, obteniendo los siguientes resultados. Este proceso es fundamental para asegurar que las propiedades del material se ajusten a los requisitos técnicos y de calidad necesarios para la pavimentación con concreto compactado con rodillo.

Tabla 1: Contenido de humedad del agregado grueso

CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO GRUESO

ITEM	DESCRIPCION	UND.	DATOS	DATOS
1	Masa del Recipiente	g	48,3	50,7
2	Masa del Recipiente + muestra húmeda	g	750,2	714,5
3	Masa del Recipiente + muestra seca	g	746,5	710,5
4	CONTENIDO DE HUMEDAD	%	0,53	0,60
	% PROM.		0,57	

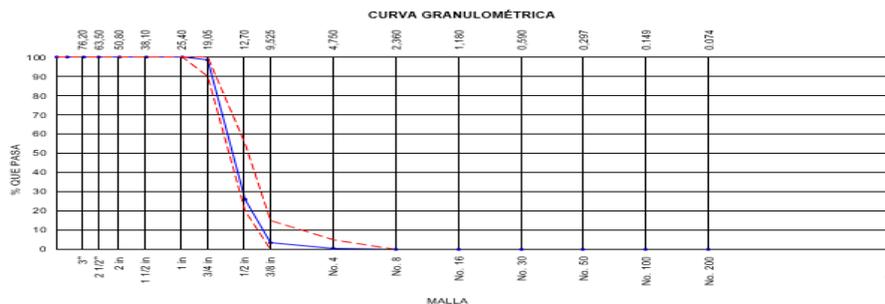
Fuente: Elaboración propia, 2024.

En relación con el análisis granulométrico de este agregado según la norma ASTM C136, el módulo de finura- MF es de 5.98, cumple con las especificaciones, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Granulometría agregado grueso

AGREGADO GRUESO ASTM C33/C33M - 18 - HUSO # 6

ABERTURA DE TAMICES Marco de 8" de diámetro		Peso Retenido g	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado que Pasa	ESPECIFICACIÓN	
Nombre	mm					Mínimo	Máximo
4 in'	100,00 mm				100,0	100,00	100,00
3 1/2 in	90,00 mm				100,0	100,00	100,00
3 in	75,00 mm				100,0	100,00	100,00
2 1/2 in	63,00 mm				100,0	100,00	100,00
2 in	50,00 mm				100,0	100,00	100,00
1 1/2 in	37,50 mm				100,0	100,00	100,00
1 in	25,00 mm				100,0	100,00	100,00
3/4 in	19,00 mm	41,9	1,35	1,35	98,6	90,00	100,00
1/2 in	12,50 mm	2251,9	72,68	74,03	26,0	20,00	55,00
3/8 in	9,50 mm	693,0	22,37	96,40	3,6	0,00	15,00
No. 4	4,75 mm	107,4	3,47	99,87	0,1	0,00	5,00
No. 8	2,36 mm					0,00	0,00
No. 16	1,18 mm					0,00	0,00
No. 30	600 µm					0,00	0,00
No. 50	300 µm					0,00	0,00
No. 100	150 µm					0,00	0,00
No. 200	75 µm					0,00	0,00
< No. 200	< No. 200	4,2	0,13	0,13	99,9	-	-
						MF	5,98
						TMN	3/4 in
						TM	1 in



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Para la determinación del peso unitario suelto y compactado de los agregados, se emplearon las especificaciones ASTM C29 C29M – 17a, se obtuvo que la densidad aparente suelta promedio es de 1585 kg/m³; la densidad aparente varillada promedio es de 1687 kg/m³ y la densidad relativa es de 2.87 kg/m³ (Tabla 3).

Tabla 3: Peso Unitario Agregado Grueso

DENSIDAD APARENTE SUELTA			
IDENTIFICACIÓN	1	2	PROMEDIO
Masa del molde (kg)	4,445	4,445	
Volumen de molde (m3)	0,002868	0,002868	
Masa de molde + muestra suelta (kg)	8,976	9,006	
Masa de muestra suelta (kg)	4,531	4,561	
Densidad aparente Suelta (kg/m3)	1580	1590	1585

DENSIDAD APARENTE VARILLADA			
IDENTIFICACIÓN	1	2	PROMEDIO
Masa del molde (kg)	4,445	4,445	
Volumen de molde (m3)	0,002868	0,002868	
Masa de molde + muestra consolidada (kg)	9,292	9,277	
Masa de muestra consolidada (kg)	4,847	4,832	
Densidad aparente Consolidada (kg/m3)	1690	1685	1687
Método utilizado en la consolidación de la muestra	Rodding (Varillado)		

Densidad Relativa (Gravedad específica) OD	2,87
% de Vacíos - muestra Suelta	44,7
% de Vacíos - muestra Consolidada	41,2

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Para determinar la gravedad específica y absorción del agregado grueso se utilizó la metodología ASTM C127-15, resultando que la gravedad específica fue 2.958 kg/m³, y el porcentaje de absorción de 0.99%. Los resultados se encuentran en la tabla 4.

Tabla 4. Gravedad específica y absorción del agregado grueso

DATOS / N° DE PRUEBA		1	2
A	Masa de la muestra seca en el horno	4964,0	4964,0
B	Masa de la muestra al aire SSD	5013,0	5013,0
C	Masa de la muestra sumergida	3286,0	3286,0

RESULTADOS	1	2	PROMEDIO
Densidad Relativa (Gravedad específica OD)	2,874	2,874	2,874
Densidad Relativa (Gravedad específica SSD)	2,903	2,903	2,903
Densidad Relativa Aparente (Gravedad específica)	2,958	2,958	2,958
Absorción (%)	1,0	1,0	0,99

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Agregado fino

El agregado fino utilizado en el diseño del hormigón hidráulico también proviene de la cantera MEGAROCK. Se llevaron a cabo métodos de laboratorio para determinar sus características físicas. Se evaluó el contenido de humedad siguiendo el método ASTM C566-19, y se obtuvo un resultado del 8% de humedad (ver tabla 5). Este análisis es crucial para garantizar que el material cumpla con los estándares necesarios para su uso en la pavimentación de la red vial.

Tabla 5: Contenido de humedad del agregado fino

CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO FINO				
ITEM	DESCRIPCION	UND.	DATOS	DATOS
1	Masa del Recipiente	g	49,4	50,7
2	Masa del Recipiente + muestra húmeda	g	523,0	528,5
3	Masa del Recipiente + muestra seca	g	496,6	500,1
4	CONTENIDO DE HUMEDAD	%	5,89	6,32
	% PROM.		6,10	

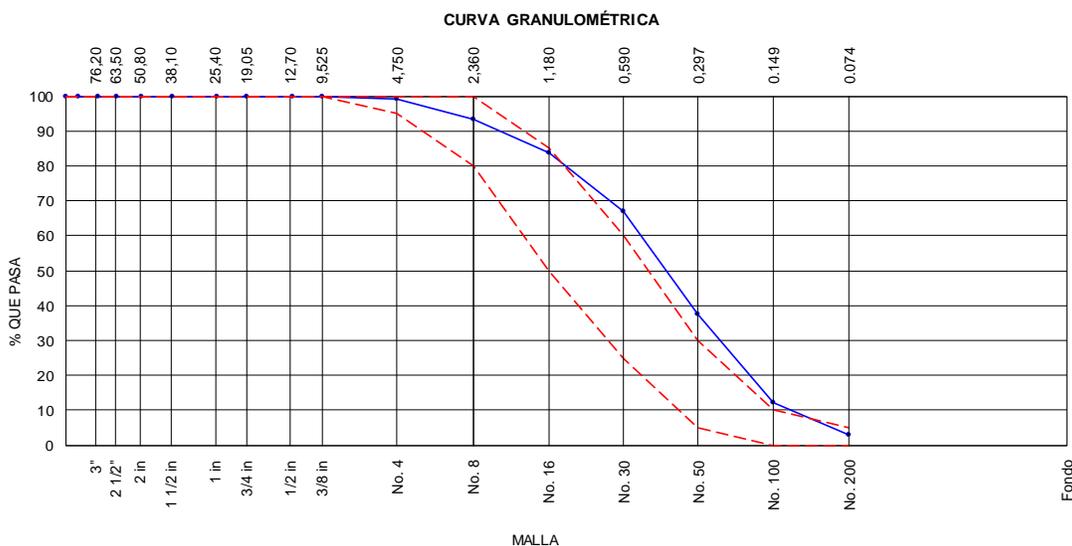
Fuente: Elaboración propia, 2024

En relación con la granulometría, se utilizó la norma ASTM C136. Se obtuvo un módulo de finura (MF) de 2.07, lo que clasifica al material como una arena gruesa, tal como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6: Granulometría Agregado Fino

AGREGADO GRUESO ASTM C33/C33M - 18 - HUSO # ARENA GRUESA

ABERTURA DE TAMICES Marco de 8" de diámetro		Peso Retenido g	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado que Pasa	ESPECIFICACIÓN	
Nombre	mm					Mínimo	Máximo
4 in'	100,00 mm				100,0	100,00	100,00
3 1/2 in	90,00 mm				100,0	100,00	100,00
3 in	75,00 mm				100,0	100,00	100,00
2 1/2 in	63,00 mm				100,0	100,00	100,00
2 in	50,00 mm				100,0	100,00	100,00
1 1/2 in	37,50 mm				100,0	100,00	100,00
1 in	25,00 mm				100,0	100,00	100,00
3/4 in	19,00 mm				100,0	100,00	100,00
1/2 in	12,50 mm				100,0	100,00	100,00
3/8 in	9,50 mm				100,0	100,00	100,00
No. 4	4,75 mm	10,0	0,95	0,95	99,0	95,00	100,00
No. 8	2,36 mm	59,0	5,61	6,56	93,4	80,00	100,00
No. 16	1,18 mm	100,9	9,59	16,15	83,9	50,00	85,00
No. 30	600 µm	177,0	16,82	32,97	67,0	25,00	60,00
No. 50	300 µm	310,8	29,54	62,51	37,5	5,00	30,00
No. 100	150 µm	267,0	25,38	87,89	12,1	0,00	10,00
No. 200	75 µm	96,0	9,12	97,01	3,0	0,00	5,00
< No. 200	< No. 200	31,4	2,99	100,00	0,0	-	-
						MF	2,07
						TMN	---
						TM	---



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Para determinar el peso unitario suelto y compactado del agregado fino, se empleó la norma ASTM C29 / C29M – 17a. Los resultados mostraron una densidad aparente suelta promedio de 1563 kg/m³, una densidad aparente varillada promedio de 1710 kg/m³, y una densidad relativa de 2.61 kg/m³, como se detalla en la Tabla 7.

Tabla 7: Densidad relativa del agregado fino

DENSIDAD APARENTE SUELTA			
IDENTIFICACIÓN	1	2	PROMEDIO
Masa del molde (kg)	4,445	4,445	
Volumen de molde (m ³)	0,002868	0,002868	
Masa de molde + muestra suelta (kg)	8,922	8,931	
Masa de muestra suelta (kg)	4,477	4,486	
Densidad aparente Suelta (kg/m ³)	1561	1564	

DENSIDAD APARENTE VARILLADA			
IDENTIFICACIÓN	1	2	PROMEDIO
Masa del molde (kg)	4,445	4,445	
Volumen de molde (m ³)	0,002868	0,002868	
Masa de molde + muestra consolidada (kg)	9,352	9,345	
Masa de muestra consolidada (kg)	4,907	4,900	
Densidad aparente Consolidada (kg/m ³)	1711	1709	
Método utilizado en la consolidación de la muestra	Rodding (Varillado)		

Densidad Relativa (Gravedad específica) OD	2,61
% de Vacíos - muestra Suelta	39,9
% de Vacíos - muestra Consolidada	34,3

Fuente: Elaboración propia, 2024.

La gravedad específica y la absorción del agregado fino se calcularon siguiendo la norma ASTM C128-15. Los resultados mostraron una gravedad específica de 2.754 kg/m³ y un porcentaje de absorción de 2.06%. La Tabla 8 presenta un desglose detallado de estos resultados.

Tabla 8: Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino

ITEM	DATOS DE ENSAYO / N° DE PRUEBA	1	2	
A	Masa secada al horno (OD)	489,9	489,9	
B	Masa picnómetro con agua hasta la marca	650,5	650,5	
C	Masa picnómetro con agua + muestra sss	962,5	962,5	
S	Masa saturada con superficie seca (SSS)	500,0	500,0	PROMEDIO
	Densidad Relativa (Gravedad específica) (OD)	2,61	2,61	2,607
	Densidad Relativa (Gravedad específica) (SSD)	2,66	2,66	2,660
	Densidad Relativa aparente (Gravedad específica)	2,75	2,75	2,754
	% Absorción	2,06	2,06	2,06

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Después de obtener los resultados de los ensayos realizados a los agregados para el concreto hidráulico, basándonos en el diseño comprobado según la referencia ACI 211.1, se procedió a formular una mezcla con una resistencia de 400 kg/cm². Esta mezcla resultó ser adecuada y cohesiva, obteniendo un slump de 2" y un rendimiento de 1.00 (ver Tabla 9).

Tabla 9: Diseño de mezclas de concreto

COMPONENTE	PESO HÚMEDO
Cemento	10,053 kg
Agua	2,315L
Aire atrapado ≈ 2%	0 kg
Adición mineral	0 kg
Aditivo	0 g
Agregado grueso	43,761 kg
Agregado fino	22,779 kg
0 kg/m ³	0 kg
0 kg/m ³	0 kg
Slump obtenido	1"
Apariencia	Buena, cohesiva
Rendimiento	1,06

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Una vez obtenido el diseño de la mezcla de concreto hidráulico, se procedió a la fabricación de las briquetas correspondientes. Tras alcanzar la madurez especificada para cada briketa, se llevaron a cabo diversas mediciones y cálculos necesarios para evaluar sus propiedades físicas. Estas mediciones incluyeron la masa, altura y diámetro promedio de las briquetas. A partir de estos datos, se calcularon el área, volumen, densidad y asentamiento de cada muestra, cuyos resultados se presentan detalladamente en la tabla 10. Este proceso es crucial para garantizar que las propiedades del concreto cumplen con los estándares de calidad y desempeño esperados.

Tabla 10: Propiedades físicas de probetas cilíndricas de hormigón hidráulico

Muestra No	Estructura	Fecha Fundición	Fecha Ensayo	Edad		Masa Gr	Altura mm	Diámetro mm	Área mm ²	Volumen cm ³	Densidad gr/cm ³	Asentamiento cm	Tipo de Consistencia	Relación L/D	Factor de Corrección	Esfuerzo (Mpa)	Carga de Falla			Resistencia Corregida		Tipo de Falla Promedio	% Resistencia		Evaluación
				Días	Gr												Kg	kN	kg/cm ²	Mpa	Específico		Real		
1	CCR	4-jun-24	11-jun-24	7	6.202	200	102,9	08316,1	1663,2	3,73	2,5	seca	1,94	1,00	39,4	33,401	327,6	401,8	39,4	Tipo 4	70 %	100,4 %	Cumple		
2		4-jun-24	18-jun-24	14	6.045	200	102,4	08235,5	1647,1	3,67	2,5		1,95	1,00	40,1	33,669	330,2	409,0	40,1	Tipo 3	70 %	102,2 %	Cumple		

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Una vez desarrollado el diseño de la mezcla de concreto hidráulico, se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión en las probetas correspondientes. Los resultados indicaron que todas las muestras evaluadas cumplían con las especificaciones establecidas por las normas NTE INEN 1 573, como se muestra en la tabla 11. Este cumplimiento normativo es fundamental para asegurar la calidad y durabilidad del concreto en aplicaciones constructivas, garantizando que el material utilizado sea capaz de soportar las cargas y esfuerzos para los cuales fue diseñado.

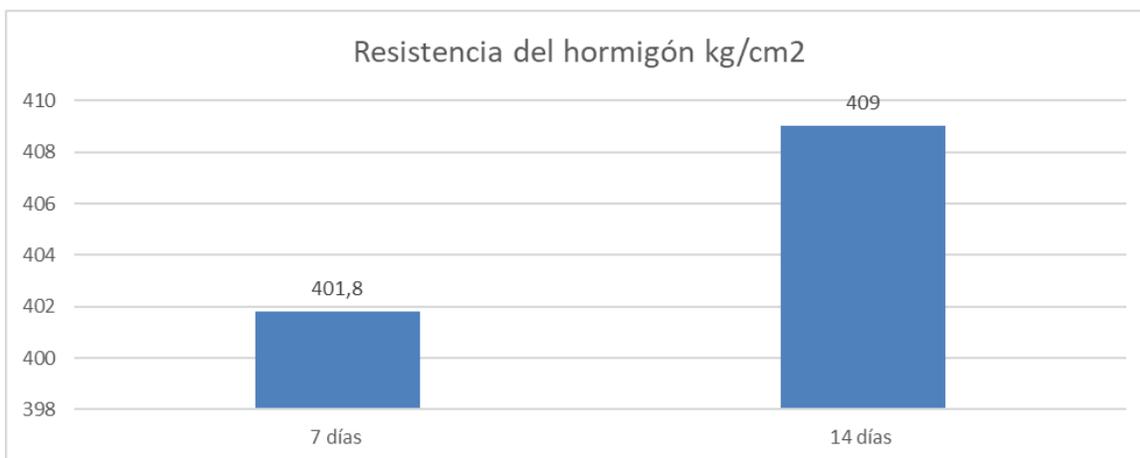
Tabla 12: Resistencias a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón hidráulico

Muestra No	Estructura	Fecha Fundición	Fecha Ensayo	Edad		Masa Gr	Altura mm	Diámetro mm	Área mm ²	Volumen cm ³	Densidad gr/cm ³	Asentamiento cm	Tipo de Consistencia	Relación L/D	Factor de Corrección	Esfuerzo (Mpa)	Carga de Falla			Resistencia Corregida		Tipo de Falla Promedio	% Resistencia		Evaluación
				Días	Gr												Kg	kN	kg/cm ²	Mpa	Específico		Real		
1	CCR	4-jun-24	11-jun-24	7	6.202	200	102,9	08316,1	1663,2	3,73	2,5	seca	1,94	1,00	39,4	33,401	327,6	401,8	39,4	Tipo 4	70 %	100,4 %	Cumple		
2		4-jun-24	18-jun-24	14	6.045	200	102,4	08235,5	1647,1	3,67	2,5		1,95	1,00	40,1	33,669	330,2	409,0	40,1	Tipo 3	70 %	102,2 %	Cumple		

Fuente: Elaboración propia, 2024.

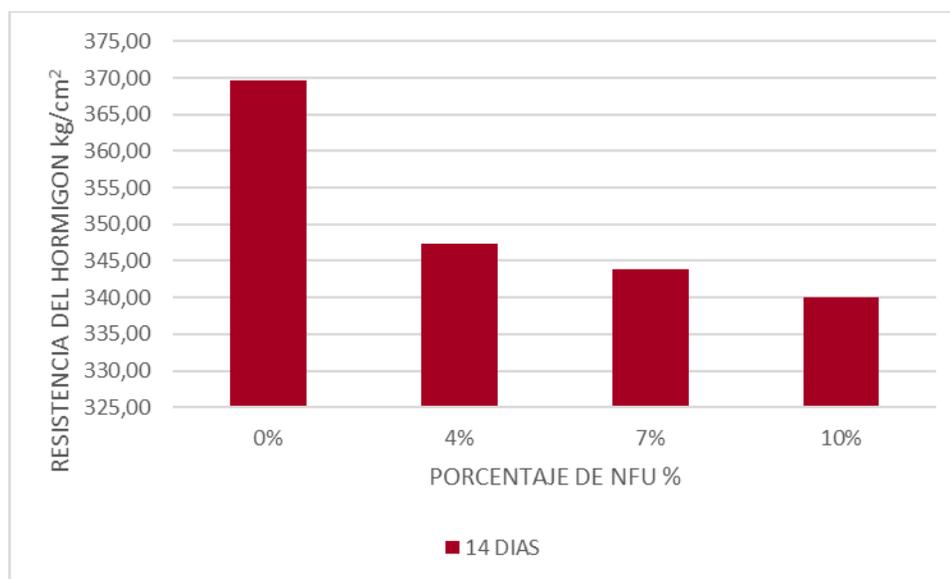
A continuación, se presentan los resultados en una gráfica que muestra las resistencias obtenidas a los 7 y 14 días. La gráfica revela que, a los 7 días y 14 días, las probetas ya alcanzaron el 100% de la resistencia requerida. Este resultado es significativo porque demuestra que el concreto desarrollado tiene una rápida ganancia de resistencia, lo cual es beneficioso para proyectos que requieren tiempos de construcción reducidos. Además, la consistencia en el desarrollo de la resistencia asegura la confiabilidad del material en aplicaciones estructurales.

Figura 1: Resistencia a compresión del concreto compactado con rodillo 7 y 14 días



Fuente: Elaboración propia, 2024.

La figura 2 ilustra los resultados de la resistencia a la compresión del hormigón hidráulico. Se observa un comportamiento positivo, donde la resistencia aumenta con el tiempo. En particular, se nota que, a los 14 días, la resistencia del hormigón supera consistentemente los valores obtenidos a los 7 días. Este incremento progresivo confirma la adecuada evolución del proceso de curado y la consolidación del material, lo que es crucial para asegurar su desempeño estructural a largo plazo.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Los resultados de las pruebas de flexión realizadas en las viguetas se detallan en la tabla 13. Estos datos son fundamentales para evaluar la capacidad del material para soportar cargas de flexión, un aspecto crucial en aplicaciones estructurales donde se requiere una alta resistencia y durabilidad del hormigón.

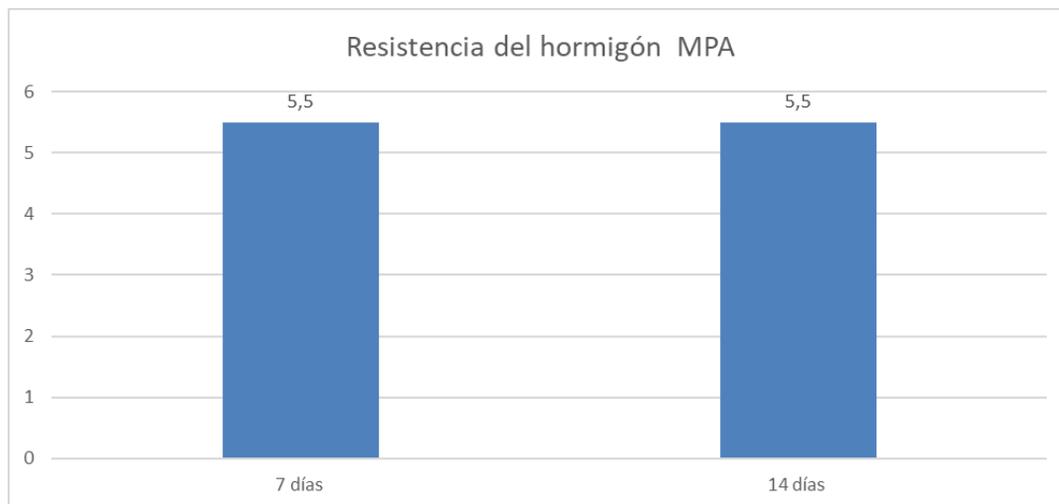
Tabla 13: Ensayo de roturas de viguetas a la flexión.

ITEM	CCR	FECHA ELABORACION	FECHA ROTURA	EDAD DIAS	DIMENSIONES			ESFUERZO DE COMPRESION O FLEXION - CARGA EN EL TERCIO MEDIO						
					LONGITUD (cm)	LADO A (cm)	LADO B (cm)	DISTANCIA ENTRE APOYOS (cm)	CARGA LIBRAS	CARGA (Kg)	RESISTENCIA ALCANZADA mpa= PL/bd'	DISEÑO (mpa)	% RESISTENCIA OBTENIDA	CUMPLE
1	7	4-jun.-24	11-jun.-24	7	54	15	15	49	8500	3864	5,50	5,5	100%	SI
2	14	4-jun.-24	18-jun.-24	14	54	15	15	49	8500	3864	5,50	5,5	100%	SI

Fuente: Elaboración propia, 2024.

El comportamiento de las muestras ensayadas revela que la resistencia a los 7 días se mantiene consistente en comparación con los resultados a los 14 días, siguiendo la misma tendencia. Este hallazgo confirma que las muestras cumplen con las especificaciones establecidas por la norma NTE INEN 1573, como se muestra en la figura 3. Esta estabilidad en los resultados es crucial para garantizar la confiabilidad y desempeño del material a lo largo del tiempo.

Figura 3: Comportamiento del ensayo de roturas de viguetas a la flexión



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Discusión

Las características físicas de los agregados de la cantera MEGAROCK de Portoviejo, utilizados para esta investigación cumplieron con las especificaciones técnicas, definiéndolo como agregados de calidad.

En las muestras ensayadas de hormigón hidráulico a analizar, se empleó la misma cantidad de cemento, agregado grueso y agua, y en las probetas con NFU se reemplazó parte de los agregados finos según su porcentaje. Como se observa en las gráficas 1, 2 y 3, el comportamiento mecánico está directamente vinculado a la cantidad de NFU en la mezcla. La dosificación de mezcla, va presentando mejor comportamiento a medida que aumenta la edad de los cilindros de muestra.

En el ensayo de resistencia a compresión del hormigón hidráulico con NFU a los 7 y 14 días, el comportamiento es similar, a medida que se le adiciona el porcentaje de NFU, la resistencia fue disminuyendo. Sin embargo, hasta la adición de NFU del 10% los resultados fueron favorables, ya que cumplen con la normativa NTE INEN 1 573. De acuerdo a Paredes (2021), la disminución de resistencia a compresión al adicionarle el caucho influye en el aumento de relación A/C, esto se debe que la arena que absorbía agua ya no lo hace al ser sustituida por el NFU.

Del mismo modo, en la evaluación del comportamiento del ensayo de roturas de viguetas a la flexión, a medida que se le adicionaba el porcentaje de NFU, la resistencia disminuye, es decir, es inversamente proporcional. No obstante, hasta la adición del 10% de NFU, el esfuerzo a flexión cumple con las especificaciones técnicas. Forigua y Pedraza (2014), revelan que estos agregados son sensibles a la dosificación de este material.

Este hormigón hidráulico con la adición de hasta el 10% de NFU, se debe emplear en pavimentos cuya carga y resistencia a la compresión sea menor o igual a 400 kg/cm^2 . Los materiales a utilizar deben ser ensayados previamente, y que sean de la más alta calidad, para que el pavimento perdure con el tiempo.

Conclusiones

En esta investigación se obtuvo un hormigón hidráulico con adición de polvo de neumáticos reciclados, que contribuyó a obtener un nuevo material, con resistencia aceptable según las normas y requerimientos que se establece para la construcción y su aplicación.

Luego de la adición de NFU, los valores de la resistencia de la compresión y flexión disminuyeron, con respecto a la muestra del diseño de mezcla original del hormigón hidráulico, es

decir, sin agregarle NFU (la cual sigue siendo el de mayor resistencia). A pesar de la disminución de resistencias, hasta el 10% de adición cumple con las normas técnicas, es decir, es posible diseñar un hormigón con sustitución del agregado fino Neumáticos Fuera de Uso hasta un 10% de adición de estos.

Referencias

1. Alvarado, R.; Díaz, G.; Somoza, C. (1967). Concreto compactado con pavimentadora como alternativa de pavimentación para la red vial de El Salvador. (Universidades de El Salvador). Universidades de El Salvador. Retrieved from https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2041/1/Concreto_compactado_con_pavimentadora_como_alternativa_de_pavimentación_para_la_red_vial_de_El_Salvador.pdf
2. Carrillo, C.; Orellana, V. (2003). Algunas consideraciones sobre aspectos relacionados con el concreto compactado con rodillo empleando en la construcción de pavimentos. Retrieved from <https://www.mop.gob.sv/wp-content/uploads/2010/03/ccr.pdf>
3. Fernández, Carlos.; Baptista, P. (2018). Metodología de la Investigación (6ta. Edici). México, Distrito Federal.
4. Hernandez, R.; Fernández, C.; Baptista, M. (2016). Metodologia de la Investigación (Vol. 4). Retrieved from <http://www.pucesi.edu.ec/webs/wp-content/uploads/2018/03/Hernández-Sampieri-R.-Fernández-Collado-C.-y-Baptista-Lucio-P.-2003.-Metodología-de-la-investigación.-México-McGraw-Hill-PDF.-Descarga-en-línea.pdf>
5. Moscoso, K.; Tunque, K. (2013). Estudio y análisis del circuito vial del asentamiento “E”, de la ciudad de Majes, aplicando la tecnología de mezclas para pavimento de concreto compactado con rodillo, diseñado con conceptos básicos de compactación de suelos. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/198127453.pdf>