

Analysis of cellular concrete as a replacement for the granular base.

Gino Flor-Chávez, Ing. Civil¹, Cristian Agurto Cueva, Ing. Civil² and Christian Almendariz, Ing. Civil³

¹University of Guayaquil, Ecuador, ginooflorch@ug.edu.ec

²University of Guayaquil, Ecuador, cristian.agurto.civil@gmail.com

³University of Guayaquil, Ecuador, christian.almendarizr@ug.edu.ec

Abstract. – In such a changing global world where it is necessary to test new forms of development that transcend time and place, it is necessary to test new materials in civil engineering works. That is why the entire systemic process that must be carried out for the elaboration of a cellular concrete with different densities is being demonstrated through laboratory analysis, for which the component that makes it up was analyzed experimentally. For a greater reliability of the information, international standards such as ASTM were used and a mathematical analysis was carried out to obtain different dosages depending on the density due to the mechanical properties it possesses, verifying that the higher density of the cellular concrete presented a better mechanical behavior. Specimens with a density greater than 600 kg/m³ meet the minimum resistance to be used as a stabilized base according to Ecuadorian regulations, and also have a higher elastic modulus and flexural strength. In addition, by using the rational method used in pavement design, two structures were analyzed, one case using a granular base and the second case using cellular concrete, obtaining that the latter case meets the stress-strain values required for the aforementioned conditions.

KEY WORDS: *Faming agent, granular base, cellular concrete, Civil Engineering, pavement.*

Análisis de hormigón celular como sustituto de la base granular.

Gino Flor-Chávez, Ing. Civil¹, Cristian Agurto Cueva, Ing. Civil² and Christian Almendariz, Ing. Civil³

¹University of Guayaquil, Ecuador, ginooflorch@ug.edu.ec

²University of Guayaquil, Ecuador, cristian.agurto.civil@gmail.com

³University of Guayaquil, Ecuador, christian.almendariz@ug.edu.ec

Resumen. - En un mundo global tan cambiante donde es necesario probar nuevas formas de desarrollo es necesario probar nuevos materiales en las obras de ingeniería civil. Es por ello, que se está demostrando mediante análisis de laboratorio todo el proceso sistémico que se debe llevar para la elaboración de un hormigón celular con distintas densidades, para lo cual se analizó el componente que le conforma de manera experimental. Para una mayor confiabilidad de la información, se emplearon normas internacionales como las ASTM y se realizó un análisis matemático para la obtención de diferentes dosificaciones en función de la densidad por las propiedades mecánicas que posee verificando que ha mayor densidad del hormigón celular presentaban un mejor comportamiento mecánico. Las probetas con densidad mayores 600 kg/m³ cumplen con la resistencia mínima para ser usada como base estabilizada según normativa ecuatoriana, así mismo presentan mayor módulo elástico y resistencia a flexión. Además, mediante la utilización del método racional en el diseño de pavimentos se analizaron dos tipos de estructuras, la primera utilizando base granular y el segundo estructura utilizando hormigón celular obteniendo que este último caso cumple con los valores de esfuerzo-deformación requerido para las condiciones citadas.

PALABRAS CLAVES: Agente espumante, base granular, hormigón celular, Ingeniería Civil, pavimento.

Abstract. - In such a changing global world where it is necessary to test new forms of development that transcend time and place, it is necessary to test new materials in civil engineering works. That is why the entire systemic process that must be carried out for the elaboration of a cellular concrete with different densities is being demonstrated through laboratory analysis, for which the component that makes it up was analyzed experimentally. For a greater reliability of the information, international standards such as ASTM were used and a mathematical analysis was carried out to obtain different dosages depending on the density due to the mechanical properties it possesses, verifying that the higher density of the cellular concrete presented a better mechanical behavior. Specimens with a density greater than 600 kg/m³ meet the minimum resistance to be used as a stabilized base according to Ecuadorian regulations, and also have a higher elastic modulus and flexural strength. In addition, by using the rational method used in pavement design, two structures were analyzed, one case using a granular base and the second case using cellular concrete, obtaining that the latter case meets the stress-strain values required for the aforementioned conditions.

KEY WORDS: Faming agent, granular base, cellular concrete, Civil Engineering, pavement.

I. INTRODUCCIÓN

Los hormigones celulares son, en esencia, morteros de cemento (no contienen agregados gruesos, o de tamaño reducido de partículas), que incorporan una fase gaseosa de burbujas macroscópicas, por la incorporación de una espuma en la masa. [1]

Para obtener un hormigón celular adecuado se debe tomar en consideración otros factores muy importantes, como, la máquina mezcladora, la velocidad de mezclado, las cantidades de componentes y las formas, que juntos son quienes darán salida a un producto final óptimo y de calidad.

El hormigón celular es un producto que se destina para obras denominadas “gruesas”, posee características propias que le hacen eficiente como aislante, es capaz de resistir altas temperaturas y daños por fuego, firmeza y bajo peso volumétricos, permite la evaporación interna y el manejo del material es versátil de fácil movilidad y empleabilidad. El proceso básico “Consiste en usar agentes espumígenos proteicos de alta calidad y el calor natural de la hidratación para el fraguado” [2]

Los valores máximos; de resistencia a la compresión llegan a 2,4 MPa, de tracción indirecta a 0,48 MPa, el CBR a 82%, para especímenes ensayados a los 28 días, parámetros adecuados para remplazar la base y subbase, existiendo una relación directa densidad-resistencia de forma que al aumentar la densidad aumenta también la resistencia. Hay una correlación entre la resistencia a la compresión, CBR y la resistencia a la tracción indirecta. [3]

Las mezclas de concreto celular, con agente espumante, con espuma de poliestireno y la unión de ambos, con el fin de realizar un análisis comparativo de estas respectivas mezclas y encontrar el concreto celular eficiente, se demuestra que el concreto celular con espuma de poliestireno es el más óptimo de entre los tres tipos de concreto, porque respecto a su masa unitaria es 50% menos denso, en relación a su peso es un 40% más ligero y a razón de su aislación térmica, es un 40% más térmico que un concreto convencional o tradicional, lo que lo convierte en un concreto celular óptimo. [4]

En relación a sus determinadas características y propiedades, este trabajo investigativo busca conocer el comportamiento de hormigón celular con diferentes densidades como capa de estructura de pavimento mediante ensayos de laboratorio sobre muestras realizadas cumpliendo los

parámetros normados. Además, determinar densidades óptimas para el uso del hormigón celular en proyectos viales en suelos de baja capacidad de soporte haciendo una comparación por medio de un diseño de pavimento usando la capacidad elástica de los materiales a emplearse.

II. METODOLOGÍA

En el diseño experimental es necesario realizar la indagación empírico - práctico que permite hallar resultados sobre la problemática identificada como objeto de estudio, en este trabajo se ha tomado como muestra la comparación de dos materiales para aplicarlos a una estructura de pavimento. En la tabla 1 se muestra los ensayos que deberán ser sometidos los materiales en la etapa experimental según la normativa ASTM. [5] y Especificaciones Técnica de Ecuador [6]

TABLA 1.
ENSAYOS REQUERIDOS PARA CARACTERIZAR UN HORMIGÓN CELULAR

Descripción	Normativa	Base granular	Hormigón celular
Tamaño de las partículas de suelo	ASTM D-422	X	
Límite de Atterberg	ASTM D-4318-95	X	
Proctor modificado	ASTM D-1557	X	
Módulo resiliente	ASTM D-4123	X	
CBR	ASTM D-1883-94	X	
Densidad del hormigón	ASTM C138		X
Resistencia a la compresión	ASTM C796		X
Agente espumante	ASTM C796		X
Módulo de Elasticidad	ASTM C469		X
Resistencia a la flexión	ASTM C78		X

En la producción de la espuma, el proceso consiste en realizar una mezcla del aditivo espumante más agua que se colocan en un recipiente, la relación es 30 litros de agua a 1 litro de espumante (relación 30/1), se proporcionan 70 lb de presión con un compresor a la mezcla, dando como resultado una espuma estable que es el componente del hormigón celular.

En el proceso se empleó una batidora o mezcladora con aspas a una velocidad constante, en donde se coloca la cantidad de mortero preparado previamente con la mezcla de cemento tipo portland + agua + aditivos plastificantes y acelerantes, esta mezcla da como resultado una lechada de cemento con una fluidez necesaria para su posterior mezclado con la espuma.

La espuma se elabora mediante un recipiente en donde se encuentra mezclado agua + agente espumante en proporción 30/1, es decir, por cada parte de agente espumante se colocan 30 partes de agua, se procede a introducir 70 libras de presión aire constante con un compresor por un tiempo de 3 minutos el cual da como resultado una espuma estable con una densidad de 70 kg/m³.

Se procede a la mezcla de estos dos componentes: por un lado, la espuma con su densidad apropiada y la lechada con una fluidez constante de 200 mm en una mezcladora de aspas con una velocidad constante en un periodo de 5 minutos. Antes de elaborar las probetas, se procede a obtener la densidad en estado fresco del hormigón celular, esta se obtiene colocando masa de hormigón celular sobre un recipiente de volumen ya conocido. (6)

III. DOSIFICACIÓN Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN CELULAR

En el presente trabajo investigativo de laboratorio, se ha empleado las siguientes ecuaciones para determinar las proporciones que se requirieren de masa de espuma para el análisis matemático a 1m³ de hormigón, esta dosificación dependerá de la densidad requerida, en este caso la masa de mortero para su análisis se la estableció de manera constante, la densidad será directamente proporcional a la cantidad colocada en la mezcla para su elaboración, es decir, a menor densidad se colocara mayor masa de espuma. A continuación, el desarrollo correspondiente y en la tabla 2 se muestra la abreviatura utilizada para la formulación de las ecuaciones.



Fig. 1. Volúmenes requeridos para el análisis matemático de la espuma

$$V_{esp} = V_{aire} + V_{agua} + V_{ae} \quad (1)$$

$$V = \frac{m(masa)}{\gamma(densidad)} \quad (2)$$

ECUACION 2 EN 1

$$\frac{m_{esp}}{\gamma_{esp}} = \frac{m_{ag}}{\gamma_{ag}} + \frac{m_{ae}}{\gamma_{ae}} \quad (3)$$

$$m_{esp} = \left(\frac{m_{ag}}{\gamma_{ag}} + \frac{m_{ae}}{\gamma_{ae}} \right) \gamma_{esp}$$

EN 1

$$Vt = \frac{mt}{\gamma t}$$

Vt = 1m³ SE DOSIFICA EN RELACIÓN A UN METRO CÚBICO

ENTONCES

$$Vt \times \gamma t = mt \quad (4)$$

$$\gamma t = mt$$



Fig 2. Componentes para el análisis matemático 1m³ de volumen
Fuente: (C. Agurto, 2020)

$$Vt = \left(\frac{mesp + ms}{\gamma_{esp} - \gamma_s} \right)$$

$$1 = \frac{(mesp * \gamma_s) + (ms * \gamma_{esp})}{\gamma_{esp} * \gamma_s} \quad (5)$$

$$\gamma_{esp} * \gamma_s = (mesp * \gamma_s) + (ms * \gamma_{esp})$$

DONDE

$$mt = ms + mesp \quad (6)$$

$$mesp = mt - ms$$

$$mesp = \gamma + ms \quad (7)$$

ECUACIÓN 7 EN 5

$$\gamma_{esp} * \gamma_s = (\gamma_t - ms) \gamma_s + ms + \gamma_{esp}$$

$$\gamma_{esp} * \gamma_s = \gamma_t * \gamma_s - ms * \gamma_s + ms * \gamma_{esp}$$

$$(\gamma_{esp} * \gamma_s) - (\gamma_t * \gamma_s) = ms(\gamma_{esp} - \gamma_s)$$

$$mesp = \frac{(\gamma_{esp} * \gamma_s) - (\gamma_t * \gamma_s)}{(\gamma_{esp} - \gamma_s)} \quad (8)$$

TABLA 2.

ABREVIATURAS EN FORMULAS APLICADAS EN ENSAYO

Componente	Masa	Densidad	Volumen
Aire	mair	γ_{air}	vair
Agua	mag	γ_{ag}	vag
Agente espumante	mae	γ_{ae}	vae
Mortero	ms	γ_s	vs
Espuma	mesp	γ_{esp}	vesp
Total	mt	γ_t	vt

La dosificación de cada material empleado para la elaboración de concreto celular se desarrolló a partir de premisas matemáticas establecidas en función de una densidad requerida o propuesta. La siguiente tabla muestra la cantidad de materia prima empleada en el laboratorio para la obtención de la masa y densidad del mortero, estas dos características físicas deben ser constantes para la posterior dosificación por metro cúbico.

TABLA 3.
DOSIFICACION DEL MORTERO DE DISEÑO DE
HORMIGON CELULAR

Densidad de diseño (kg/m3)		600	
Materiales	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)	Volumen (m3)
Cemento (kg)	5,00	2850	0,0018
Agua	1,50	1000	0,0015
Plastificante 0,8%	0,04	1220	0,0000
Acelerante 0,4%	0,02	1200	0,0000
Relación W/C	0,30	0,30	0,30
Características físicas	6,56	1985,57	0,0033

La cantidad necesaria de masa de espuma para el diseño por metro cúbico se describe en la ecuación 8, y debe incrementarse en un 60% debido a la pérdida de espuma que se produce en el proceso de elaboración. Para la producción de la masa de espuma requerida se debe proporcionar la cantidad necesaria de agente espumante y agua de mezclado, estos valores y propiedades de la espuma se detallan en la siguiente tabla [7].

TABLA 4.
DOSIFICACION DE LA MASA DE ESPUMA DEL HORMIGON
CELULAR

Espuma para el diseño		400
Materiales		(kg/m3)
Masa de espuma requerida (kg)		40,96
Factor de corrección por pérdida de espuma		1,60
Masa total requerida (kg)		65,53
Densidad Espuma (kg/m3)		50,00
Cantidad de aditivo espumante (kg)		2,11
Cantidad de agua para general Espuma		63,00

El proceso de dosificación se lo puede realizar para cualquier densidad de hormigón celular, con las ecuaciones detalladas anteriormente. Para el caso de estudio se va a realizar la dosificación para densidades de 400 a 600 kg/m³. Este peso volumétrico está en función de su aplicación, ya que sus propiedades mecánicas varían según el incremento de densidad

TABLA 5.
DOSIFICACION PARA DIFERENTES DENSIDADES.

Dosificación para 1m3				
Densidades kg/m3	400	450	550	600
Cemento (kg)	273,66	312,63	390,94	429,87
Agua Diseño	82,10	93,79	117,28	128,96
Plastificante	2,19	2,50	3,13	3,44
Acelerante	1,09	1,25	1,56	1,72
Agente Espumante	1,09	2,66	1,56	2,40
Agua Espuma	16,42	77,00	23,46	69,62
Fluidez (mm)	200,0	190,00	220,00	213,00
Densidad en estado fresco (kg/m3)	480	545	580	677

OVEN-DRY DENSITY (DENSIDAD SECA AL HORNO).

Este método de prueba cubre la preparación y prueba de cilindros moldeados de 100 por 200 mm [4 por 8 pulgadas]. Este proceso se lo realizó en periodos de 24h, introduciendo la probeta de hormigón con el peso ya conocido a un horno de temperatura 110 +/- 5° y cada 24 horas proceder a retirar la muestra y tomarle su peso para ir registrándolo. Esto se realiza hasta que la probeta pierda menos del 1% de humedad, es decir, que la masa se encuentre constante y exista mínima pérdida, como se conoce la masa en estado seco al horno y el volumen de la probeta de hormigón se procede a conocer la densidad (-ASTM).

Debido a la porosidad que presenta el concreto celular, este absorbe partículas de agua en su interior, el porcentaje de pérdida total de humedad que cada probeta sufre al ser sometido al ensayo de densidad secado al horno. El valor de pérdida de humedad se encuentra en un rango de 10 al 18% como se muestra en la figura 3.

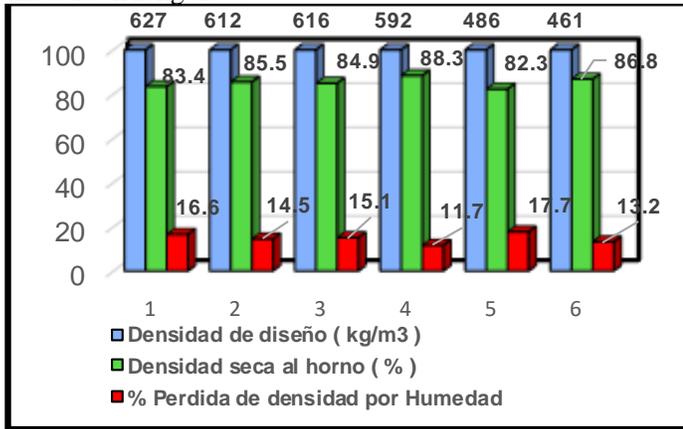


Fig. 3. Porcentaje de densidad seca y pérdida de humedad en función de la densidad de diseño

PROPIEDADES MECÁNICAS

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En el proceso de muestra se toma como base un cilindro con medidas de 4" por 8", los cuales se proceden a ser llenados con el material de prueba haciendo golpes para que escape el aire y se vayan formando capas uniformes en el mismo. Se debe tomar en consideración el lugar en el que vayan a reposar para el fraguado inicial que es de 24 horas y después, este podrá extenderse en un tiempo de 2 a 3 días y debe quedar en temperaturas controladas ya que estos pueden sufrir algún daño o alteración para las pruebas, así mismo evitar la alteración por movimientos bruscos o golpes fuertes. Los cilindros deberán estar sanos debido a que serán sometidos a la compresión mediante una máquina de carga la cual introduce una carga axial a la probeta hasta que esta falle, esta carga máxima de soporte del testante dividida para el área de aplicación de la carga dará como resultado el esfuerzo desarrollado por el cilindro (495, 2007-09).



Fig. 4. Aplicación de carga axial.

El esfuerzo a la compresión y flexión es la capacidad que el hormigón presenta al ser sometido a una carga, ya sea axial para el caso de la compresión y carga puntual para la flexión. Estos esfuerzos desarrollados son propiedades mecánicas que describen la capacidad que este material presenta. En la tabla 5 se muestran los resultados que se registraron de diferentes densidades con propiedades mecánicas que van en incremento en función de la densidad.

TABLA 5.
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE PROBETAS CON DISTINTAS DENSIDADES

DESCRIPCIÓN	Oven Dry Density	Densidad Kg/m³	f'c MPa	f'c Kg/cm²	Mr. MPa	
Prueba # 3	523	627	1,98	20,19	0,69	
		612	1,68	17,13		
		616	1,84	18,76		
		592	1,45	14,79		
Prueba # 2	400	486	0,66	6,73	0,57	
		461	0,61	6,22		
		477	0,64	6,53		
		438	0,53	5,40		
Prueba #1	351	423	0,51	5,20	1,11	
		563	1,33	13,56		
		470	575	1,40		14,28
		679	2,14	21,82		
		550	695	2,27		23,15
		807	3,28	33,45		
		660	810	3,62		36,91

Se puede comprobar que el esfuerzo y el peso volumétrico de cada probeta es directamente proporcional, es decir, a mayor densidad su resistencia a la compresión incrementa. Para el uso de este material en un diseño de estructura pavimento se tomarán en cuenta resistencias que van desde los 15 kg/cm² a 30 kg/cm², debido a que los datos obtenidos poseen un grado de confiabilidad del 97%, esto quiere decir, que el valor de seguridad se encuentra dentro del rango aceptable.

La curva presentada en la ilustración 5 detalla el comportamiento exponencial que presenta la resistencia a la compresión en función de la densidad, esta se elaboró con los diferentes datos obtenidos en laboratorio

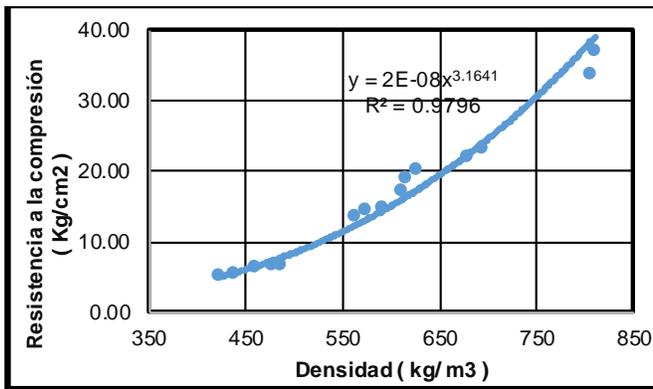


Fig 5. Curva densidad VS Resistencia a la compresión

Partiendo de la densidad de diseño se podrá obtener el valor promedio del módulo elasticidad estático y la resistencia a la compresión aproximada para hormigones celulares se puede obtener los siguientes resultados.

TABLA 6.
Resistencia a la compresión según la densidad del hormigón celular

Modulo elástico (MPa)	Resistencia a compresión (kg/cm2)	Densidad (kg/m3)
571	18,86	600
498	17,13	550
260	6,53	450
236	5,40	400

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

En el análisis del comportamiento a la flexión se debe calcular el módulo de rotura cumpliendo la norma ASTM C78, la cual indica que la carga se aplica en cada tercio de la luz. El módulo de rotura es más bajo en el caso de la carga en el punto medio y la tensión máxima en el tercio medio de la viga. [6].

El módulo de ruptura de la viga se calcula de la siguiente manera:

- Si la fractura inicia en la superficie de tensión, dentro del tercio medio de la longitud entre apoyos, se calcula el módulo ruptura como sigue:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (9)$$

Dónde:

R= Modulo de Ruptura (psi ó MPa)

P= Carga máxima aplicada, indicada por la máquina (lbf ó N)

L= Longitud entre apoyos, (pulg. ó mm)

b= Ancho promedio del espécimen (pulg. ó mm), en la fractura.

d = Altura promedio del espécimen (pulg. ó mm), en la fractura.



Fig. 6. Aplicación de carga para vigas.

En el análisis del módulo de rotura se emplearon tres vigas debidamente normadas con diferentes densidades para ser sometidas a flexión, este esfuerzo se comporta de manera lineal en función de la densidad además su resistencia a la flexión va de un 10 a 25% del esfuerzo de compresión desarrollado, en el caso de estudio se tiene que para una densidad de 600 kg/cm² el módulo de rotura promedio encontrado es de 0,69 MPa. (Ver tabla 5).

Así mismo se puede obtener una correlación entre el módulo de rotura y la densidad verificando que son directamente proporcional, o sea, a media que aumenta la densidad aumenta el modulo tal como se observa en la figura 7.

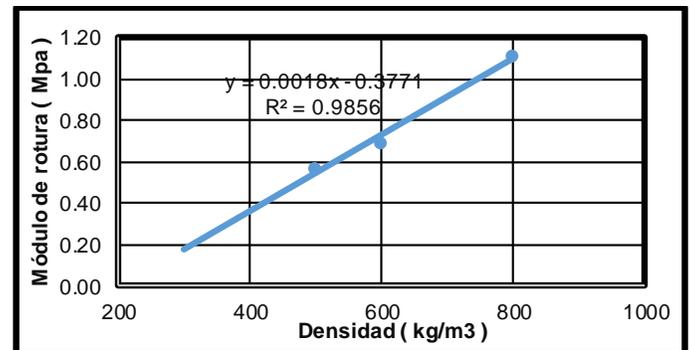


Fig. 7. Módulo de Rotura vs Densidad

MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO

En el procedimiento de laboratorios y análisis se efectuó mezclas con diferentes tipos de densidad, esta densidad es directamente proporcional con el modulo elástico y su resistencia a la compresión, es decir, a mayor resistencia su módulo elástico aumenta, en base a ello se elaboraron cuatro densidades (400, 450, 550 y 600) kg/m³, es así; que se elaboraron 4 cilindros con medidas de 4x8" y 6x12" con fecha de curación de 28 días los cuales fueron introducidos a las pruebas de elasticidad (ASTM, 2016).

A continuación, se determina la ecuación matemática con la que procederemos a realizar el cálculo del módulo elástico que se desarrolla tanto en el 40% de la carga aplicada a la probeta (caso 1), y el valor máximo que este desarrollara que será cuando la deformación ya no sea en proporción lineal con el esfuerzo en el testigo (caso 2), esta relación máxima será observada en la curva esfuerzo vs deformación. Para la siguiente expresión matemática comenzaremos con la premisa que el módulo elástico se desarrolla en la parte lineal de la curva esfuerzo – deformación, por lo tanto, en la ecuación de la recta el valor del módulo elástico será igual a la pendiente de dicha recta.

$$y = mx + b \quad (10)$$

$$m = E = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}$$

Donde:

- y2: Esfuerzo correspondiente al 40% de la resistencia (caso 1), y esfuerzo último en la zona elástica (caso 2).
- y1: Esfuerzo inicial en la parte lineal de la recta.
- x2: Deformación unitaria correspondiente al 40% de la resistencia (caso 1), y deformación última en la zona elástica (caso 2).
- x1: Deformación unitaria inicial en la parte lineal de la recta.
- E: Modulo de elasticidad obtenido mediante la relación de esfuerzos y deformaciones.



Fig. 8. Ensayo de Modulo elástico estático

La curva esfuerzo – deformación de la siguiente ilustración 9 define las zonas de comportamiento que sufre el material al ser sometido a cargas, se procede a analizar la zona elástica del concreto celular, dicha zona se presenta en la parte lineal de la curva y será igual a la pendiente de la recta que esta genera.

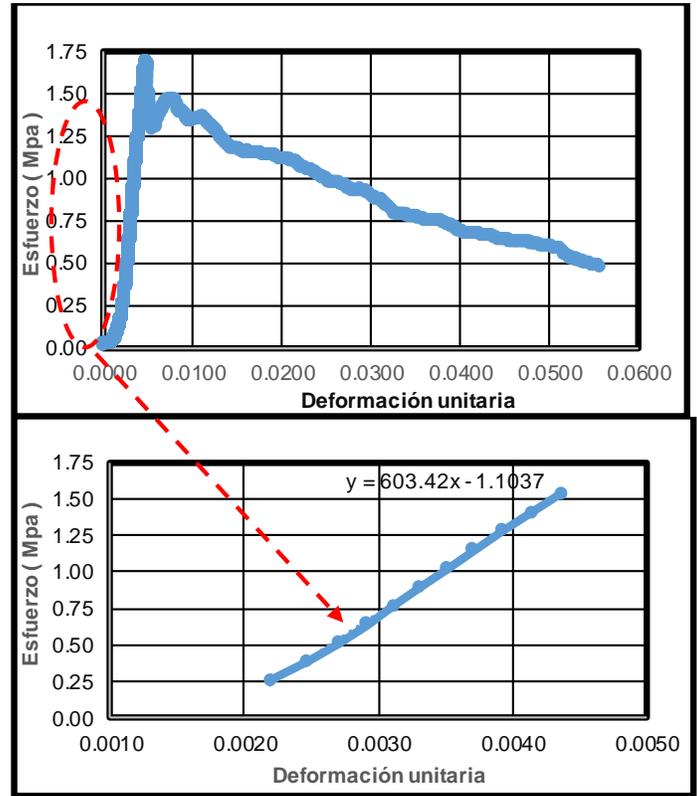


Fig. 9. Esfuerzo - Deformación (densidad 600kg/m³)

Se analiza la zona elástica de la curva esfuerzo – deformación descrita en la ilustración 9, este análisis se dará cuando el valor de la deformación unitaria este en un 40% de la carga y en el límite elástico que es en el instante que las deformaciones incrementan en gran magnitud, para el diseño se va a tomar en consideración el promedio de estos dos valores. En el caso del diseño de la estructura vial se tomará en consideración la densidad de 600 kg/cm² esta desarrolla un valor de módulo elástico promedio de 571 MPa.

TABLA 7.
VALOR DEL MODULO ELASTICO PARA 600kg/m³

E carga 40%=	556 MPa
E L. elástico =	587 MPa
E prom =	571 MPa
E prom =	82858 Psi

IV. ANALISIS EN ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

En el diseño de pavimento para este trabajo se emplea el método racional, el cual permite determinar de manera sintetizada el tipo de estructura que se tendrá dentro del desarrollo de la obra civil. La metodología racional caracteriza

cada capa de la estructura del pavimento, asumiendo un espesor por cada manto. Para ello, se determinan las deformaciones de la estructura del pavimento ante las cargas de diseño, por medio de modelos computacionales (ALIZE), después se comparan los resultados con las leyes de fatiga [10].

Esté método considera los siguientes parámetros:

- Estimación del tránsito de diseño.
- Característica de los materiales.
- Determinación del módulo resiliente de los componentes de la estructura.
- Capas asfálticas.
- Modelización de la estructura.
- Calculo de esfuerzos y deformaciones.
- Definición de esfuerzos y deformaciones admisibles.
- Comparación de solicitaciones calculadas con las admisibles.
- Diseño definitivo de la estructura.

Se evalúa las deformaciones inducidas en el eje (x) por flexo tracción entre la capa de rotura y la de soporte son deformaciones admisibles en el eje (y) generadas en la capa que está en contacto con la sub rasante, estos parámetros detallados estarán en función de los materiales aplicados a la estructura vial y serán comparados con la capacidad que tenga el suelo de soporte para resistir dicha deformación.

En el análisis se tomarán en cuenta los parámetros descritos en la tabla 3 para el diseño vial, estos serán los datos de T_{pd} para una vía de dos carriles con un periodo de diseño de 20 años y los parámetros mecánicos del suelo de fundación (Sub rasante) que va a soportar la estructura vial.

TABLA 8.
PARAMETRO PARA EL DISEÑO VIAL

Datos para el Diseño	Tráfico
Ejes simples de 8.2 Ton	12000000
C.B.R	3%
Módulo Resiliente	30 MPa

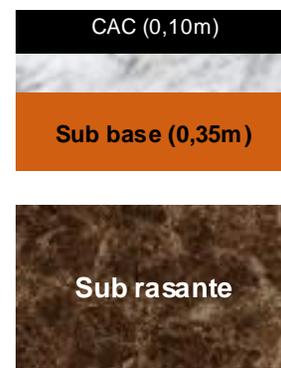
El diseño se lo va a realizar analizando dos casos, el primero será una estructura típica vial que consta de una capa de rodadura asfáltica el cuales tará asentado sobre una capa de base granular y a su vez por una sub base antes de entrar en contacto con el suelo de soporte, el segundo caso se basa en el reemplazo de la capa de base granular por una capa de hormigón celular y así poder analizar el comportamiento que este desarrollará en una estructura vial en la metodología aplicada se realizaran diferentes interacciones con espesores distintos hasta que esta cumpla con los esfuerzos admisibles por la sub rasante.

El primer análisis de diseño de pavimento flexible se va a realizar usando materiales que cumple con los parámetros especificados en el MTOP [6].

TABLA 9.
ESTRUCTURA DE PAVIMNETO CONSIDERANDO BASE GRANULAR

Material	Espesores (m)	CBR (%)	Módulo resiliente (MPa)	Relación de Poisson
Hormigón asfáltico	0,10	-	2758	0,35
Base granular	0,30	80	186	0,35
Subbase	0,30	40	70	0,35
Subrasante	-	3	30	0,35

Usando los ábacos de la ASSTHO para bases granulares tenemos que para un CBR de 80% es igual a un Mr = 186 MPa y 2758 MPa para una mezcla asfáltica en caliente se hace coner el programa ALIZE como se observa en la figura 10.



Alize-Lcpc - Results (Structure : data shown on the Structure screen, Reference load)							
Tesis CAC							
thick. (m)	modulus (MPa)	Poisson coeff.	Zcalcul (m)	EpsT (µdef)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdef)	SigmaZ (MPa)
0,100	2758,0	0,350	0,000	10,3	0,360	-157,9	0,674
	bonded		0,100	-314,5	-1,145	330,6	0,173
0,300	186,0	0,350	0,100	-314,5	0,009	872,1	0,173
	bonded		0,400	-276,6	-0,055	378,2	0,035
0,300	70,0	0,350	0,400	-276,6	-0,009	572,6	0,035
	bonded		0,700	-208,3	-0,014	336,3	0,014
infinite	30,0	0,350	0,700	-208,3	-0,002	501,4	0,014

Fig 10. Estructura vial considerando materiales granulares (caso I)

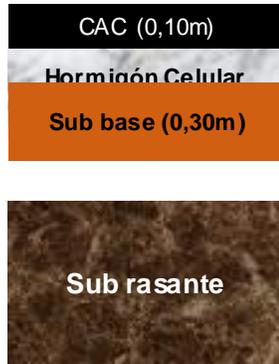
EN la figura 10 se observa que el esfuerzo de flexo tracción generado en la capa de soporte de la rasante es de 0,055 MPa (SIGMA T), y la deformación vertical inducida al suelo de soporte tendrá un valor de 501,4 millonésimas (EpsZ).

Los esfuerzos inducidos por la estructura vial dependerán de las propiedades mecánicas de cada material, la estructura se comportará como una sola capa que absorberá las cargas producidas por el tráfico en el proyecto vial. Para el análisis del caso II, el cual consiste en el reemplazo de la capa granular por concreto celular se toma en consideración todos aspectos descritos en el caso I, se remplazará la capa granular

por el material que se va a estudiar en esta estructura como lo muestra la figura 11.

TABLA 10.
ESTRUCTURA DE PAVIMENTO CONSIDERANDO HORMIGON CELULAR

Material	Espesores (m)	CBR (%)	Módulo resiliente (MPa)	Relación de Poisson
Hormigón asfáltico	0,10	-	2758	0,35
Hormigón celular	0,30	-	571	0,25
Subbase	0,30	40	70	0,35
Subrasante	-	3	30	0,35



Alize-Lcpc - Results (Structure : data shown on the Structure screen, Reference load)

Tesis CAC							
thick. (m)	modulus (MPa)	Poisson coeff.	Zcalcul (m)	EpsT (µdef)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdef)	SigmaZ (MPa)
0,100	2758,0	0,350	0,000	8,9	0,238	-64,9	0,676
	bonded		0,100	-151,8	-0,463	208,4	0,273
0,300	571,0	0,250	0,100	-151,8	-0,020	489,1	0,273
	unbond.		0,400	-253,0	-0,177	178,9	0,020
0,300	70,0	0,350	0,400	98,2	0,022	55,9	0,020
	bonded		0,700	-83,6	-0,001	204,9	0,014
infinite	30,0	0,350	0,700	-83,6	0,004	369,1	0,014

Fig. 11. Estructura vial considerando hormigón celular (caso II)

El esfuerzo de flexo tracción inducido por la estructura vial según el análisis de cálculo generado mediante el programa ALIZE será de - 0,020 MPa. Este valor en el esfuerzo negativo indica que la resistencia desarrollada es de flexión y la deformación producida en el eje (y) es de 369,1 millonésimas.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los esfuerzos inducidos en el primer y segundo caso se deben comparar con los esfuerzos admisibles por la subrasante en la deformación vertical y la capacidad admisible de flexo tracción en la capa soportante de la carpeta asfáltica la vía, mediante las siguientes ecuaciones determinaremos los esfuerzos admisibles por la capa de soporte del terraplén.

$$\frac{\sigma}{Mr} = 1 - \frac{\log(N)}{a} \quad (11)$$

$$\frac{\sigma}{0.69} = 1 - \frac{\log(12000000)}{12}$$

$$\sigma = 0,41 \text{ MPa}$$

N: número de repeticiones de ejes equivalentes (8,2 Ton) para la falla.

σ: Tensión producida en la fibra inferior de la capa que soporta la rasante por carga de eje equivalente de 8,2 Ton.

Mr: Resistencia de ruptura por flexo tracción del material.

a: El coeficiente de ajuste que tiene un valor de 12 para gravas – cemento

ezad = deformación unitaria admisible en la subrasante.
ezad = 0.028x(N_{8.2Ton})^{-0.25}x1000000 (millonésimas)

$$ezad = 0.028 * (12000000^{-0.25}) * 1000000 = 475.7 \mu$$

Para que la estructura pueda soportar las cargas producidas por el tráfico de diseño, se debe considerar los valores obtenidos mediante el análisis producido por el software ALIZE, el cual evalúa los esfuerzos inducidos en la estructura. La tabla 11 detalla los valores inducidos en los casos de estudio y estos deberán ser menores que los admisibles por la sub rasante.

TABLA 11.
RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL METODO RACIONAL.

Materiales	Cargas Inducidas		Cargas admisibles	
	estructura vial		Subrasante	
	Flexo tracción Sigma T (MPa)	Deformación vertical Epsz (µ)	Flexo tracción Sigma T(MPa)	Deformación vertical Epsz (µ)
Base granular	-	501,4	0,41	475,7
Hormigón celular	0,020	369,1		

En el análisis comparativo se determinó que la estructura que tiene como capa hormigón celular cumple con los parámetros de esfuerzo – deformación admisible, por lo que se realizarán iteraciones para optimizar espesores de capa para el caso II.

Para el primer caso de análisis el, espesor de la capa de base granular no satisface las condiciones de la metodología debiendo incrementar los espesores de la capa de rodadura y la base granular para absorber los esfuerzos – deformación producidas por el tráfico generado en la vía. Se realizaron varias interacciones hasta encontrar una estructura vial que cumplan con los esfuerzo y deformaciones admisibles por las sub rasante. Para cumplir con los parámetros que pide esta metodología se deberá aumentar el espesor de la carpeta asfáltica como dela base granular como se observa en la figura 12.

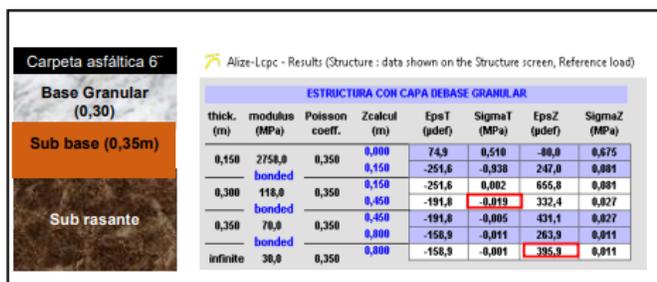


Fig. 12. Estructura vial con materiales granulares con espesores mayores.

Por la capacidad del hormigón celular su uso en una estructura vial es una opción viable para colocarlo como capa de terraplén sobre suelos de baja capacidad de soporte ya que su capacidad elástica, resistencia a la compresión y módulo de rotura hacen de este material idóneo para una estructura vial, para el caso de estudio se recomiendan densidades de 600 a 800 kg/m³, la dosificación de cada densidad podrá realizarse con las expresiones matemáticas obtenidas.

V. CONCLUSIONES

- Las características físicas y mecánicas de los materiales cumplen con los parámetros para el uso constructivo en proyectos viales en nuestro país, en el caso de la base granular su clasificación, densidad y soporte tienen características requeridas para su uso en un terraplén.
- Con los datos obtenidos de las muestras de hormigón celular se logró obtener curvas de correlación que describen el comportamiento mecánico del material.
- Con los resultados de este análisis se define que el concreto celular de 400 a 800 kg/m³, presentan resistencia a la compresión de 5 a 30 kg/cm², un esfuerzo a la flexión promedio del 10 al 15 % del esfuerzo de compresión y un módulo elástico estático que va de 200 a 600 MPa.
- La capacidad elástica, resistencia a la flexión y Módulo de rotura están en función de la densidad que este posea y son directamente proporcionales, esto quiere decir que a mayor densidad las propiedades mecánicas se incrementan.
- Se evaluó el hormigón celular a la peor condición posible que ocurre cuando este pierde toda su humedad verificando que las propiedades físicas y mecánicas decaen en un rango del 20 al 25%.
- El análisis del concreto celular como capa de soporte de la carpeta asfáltica se realizó con una densidad de 600 kg/m³. En el diseño de las estructuras de pavimento por el método mecanicista se pudo constatar que el hormigón celular por su resistencia a la compresión, esfuerzo de flexión y módulo de elasticidad contrae los esfuerzos generados.

RECOMENDACIONES

- Se puede optimizar la dosificación del concreto celular incluyendo una arena con un contenido granulométrico apropiado que no provoque pérdida de fluidez, debido a que estos diseños se realizan con una rapidez constante.
- Se recomienda hacer uso de nuevos y componentes que potencien el hormigón celular, con el fin de crear productos innovadores, rentables y así expandir nuevos ejes de cambios constructivos y de alto rendimiento tecnológico, cuya premisa es la de traer a alcance de todo el país, materiales más eficientes y eficaces con capacidad de ser utilizados y adoptados en todos los sectores.
- La aplicación constructiva del mortero celular deberá hacerse por capas para evitar la segregación de la mezcla y que esta sufra retracción debido al calor para no afectar las propiedades físicas y mecánicas.

Referencias

- ICPA. (2016). ICPA-FT-011. Hormigones livianos. Obtenido de Instituto del Cemento Portland Argentino: <https://web.icpa.org.ar/wp-content/uploads/2019/04/ICPA-FT-011Hormigones-livianos.pdf>.
- M. Palva, "Hormigón celular. Red científica de construcción: https://www.ecud.cu/Hormig%C3%B3n_celular .
- Mejía, L. 'Utilización del hormigón celular como base y subbase en la construcción de carreteras, 2010.
- Arrapa, J, "Análisis y diseño comparativo de concreto celular usando espuma de poliestireno y agente espumante, Universidad Andina Néstor Cáceres, 2016
- ASTM, A. S. (s.f). NORMAS ASTM. United State
- Republica del Ecuador, M. d.-M.-O.-F.-2. (2002). Especificaciones Generales para la construcción de Caminos y Puentes . Quito.
- J.-G. Lu, "Title of paper with only the first word capitalized," J. Name Stand. Abbrev., in press.
- Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface," IEEE Translated J. Magn. Japan, vol. 2, pp. 740-741, August 1987 [Digest 9th Annual Conf. Magnetics Japan, p. 301, 1982].
- M. Young, The Technical Writer's Handbook, Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- Reyes. (2016). Diseño racional de pavimentos . Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería