

Uso del ultrasonido para la evaluación de la homogeneidad en la densidad de especímenes de prueba trapezoidales de concreto asfáltico

Yader Alfonso Guerrero Pérez, yagcivil@gmail.com
Leto Momm, leto.momm@gmail.com
Breno Salgado Barra, brenobarra@gmail.com
Ivo Padaratz, padaratz@gmail.com
Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil

Fecha de recepción: Mayo del 2010

Fecha de aprobación: Mayo del 2011

Resumen

En la metodología francesa, dos de los ensayos más importantes en la preparación de las mezclas de concreto asfáltico son: el ensayo de fatiga y el ensayo del módulo complejo. Estos ensayos son realizados con cuerpos de prueba trapezoidales extraídos de placas, previamente compactadas, bien sea extraídas de campo o preparadas en laboratorio, las cuales deben tener uniformidad en la distribución de los granulares y homogeneidad de los vacíos. Generalmente, el método para la evaluación de la homogeneidad en la placa es el gamadensimétrico, sin embargo, este equipamiento no está disponible. Por esta razón, con la técnica del ultrasonido, se busca una manera de evaluar la homogeneidad en las placas que atienda las limitaciones de precisión y estadística indicadas en las normas de los ensayos de módulo y fatiga. El trabajo evalúa el uso del método de ultrasonido por el modo de transmisión directa, en placas de concreto asfáltico para la determinación de la velocidad de propagación de onda. Uno de los criterios de selección de los cuerpos de prueba trapezoidales a utilizar en los ensayos de fatiga y de módulo complejo es el porcentaje de vacíos. Los valores resultantes de los porcentajes de vacíos de los cuerpos de prueba trapezoidales fueron comparados con las velocidades de onda obtenidas en los ensayos con ultrasonido. Con la finalidad de facilitar el análisis de los datos, los resultados son presentados de forma gráfica. Este estudio verificó que, aunque el ensayo de ultrasonido pueda detectar la variación en la homogeneidad de las placas de concreto asfáltico, el nivel de precisión del aparato utilizado, aún no permite que el ensayo sea usado con el objetivo de selección de placas para la realización de los ensayos de fatiga y de módulo, ya que la selección de los cuerpos de prueba finales es bastante rigurosa.

Palabras clave: concreto asfáltico, ultrasonido, porcentajes de vacío, densidad del espécimen.

Abstract

In the French methodology, two of the most important tests for the elaboration of asphalt concrete mixtures are: the fatigue test and the complex modulus test. These tests are made with trapezoidal samples extracted from pre-compacted blocks, either extracted from the field or prepared at the laboratory, which must have uniform granular distribution and void homogeneity. Generally, the method used to evaluate the homogeneity of the block is the gamma densitometer; however, this equipment is not available. For this reason, with the ultrasound technique, we look for a way to evaluate the homogeneity of the blocks while addressing the precision and statistic limitations showed in the test procedures for fatigue and modulus. This work evaluates the use of the ultrasound method by the direct transmission mode, on asphalt concrete blocks to determine the wave's propagation speed. One of the choosing

criteria for the trapezoidal samples which will be used for the fatigue and complex modulus tests is the void percentage. The resulting values of the void percentages for the trapezoidal samples were compared with the wave speeds obtained by the ultrasound test. With the purpose of facilitate the data analysis, the results are presented in a graphic form. This study verified that, even though the ultrasound test can detect the homogeneity variation in the asphalt concrete blocks, the precision level of the equipment being used, doesn't allow yet the use of this test with the objective of selecting the blocks to perform the fatigue and complex modulus tests, because the selection of the final test samples is very rigorous.

Key Words: Asphalt Concrete, Ultrasound test, void percentages, specimen density.

INTRODUCCIÓN

En la metodología francesa, el rigor en el momento de la selección de los cuerpos de prueba finales por porcentaje de vacíos y por dimensiones, exige que la placa de la cual los cuerpos de prueba son cortados tenga homogeneidad, para que un mayor número de cuerpos de prueba pueda ser aprovechado. Existe hasta el momento un ensayo que es realizado para tal fin, que es el ensayo gamadensimétrico, pero este equipo no está disponible actualmente, lo que prioriza la necesidad de la viabilización de otro tipo de ensayo que de igual forma pueda evaluar la homogeneidad en la placa.

Actualmente, diversos tipos de ensayos no destructivos han sido empleados, tales como: Esclerometría, gamagrafía, pacometría, eco-impacto y ultrasonido entre otros. El ultrasonido, viene siendo usado como uno de los ensayos no destructivos más populares, debido a su facilidad de uso, bajo costo, rapidez de la ejecución de los ensayos y a la ausencia de daños en el material analizado. Sumado al bajo valor del equipo necesario, permite que el ensayo del ultrasonido, ofrezca la viabilidad de su uso en la práctica, sea en el laboratorio o en el campo. En teoría, el ultrasonido ofrece perspectivas para su utilización en concretos asfálticos. En este trabajo el ensayo fue usado por

el modo de transmisión directo para la evaluación de la homogeneidad de placas de concreto asfáltico, moldeadas siguiendo la metodología de compactación francesa.

Después del corte de las placas en cuerpos de prueba trapezoidales se determinaron los valores de la densidad aparente y los porcentajes de vacíos. Estos valores por su vez son comparados con la velocidad de propagación de la onda ultrasónica medida en la posición del cuerpo de prueba en la placa.

ULTRASONIDO

El ultrasonido es una onda acústica que sobrepasa los 20kHz (límite de audición humana). Durante el proceso de transmisión de la onda ultrasónica son generados tres tipos de ondas: longitudinales, transversales y superficiales. Las longitudinales o ondas de compresión son las más veloces, seguidas de las transversales y después las superficiales.

El método del ensayo de ultrasonido se fundamenta en el análisis de pulsos ultrasónicos que se propagan por los materiales. En la mayoría de las veces, se usa un transductor para la emisión del pulso y otro para la recepción del pulso después de su propagación en el material. A partir de la medida del tiempo de recorrido que la onda lleva para atravesar el material y de la evaluación de la velocidad de propagación correspondiente se puede obtener información sobre la calidad, la composición de su trazo y, en algunas condiciones, el cargamento a que está sometido (en estos dos últimos casos, hasta el presente, solamente en condiciones laborales controladas)

El estudio de los materiales usando este ensayo es posible debido al hecho de que los parámetros que generalmente interfieren en la velocidad de propagación de la onda acústica, dependen de la densidad y de las propiedades elásticas del material y casi nada de su geometría, como puede ser visto en la ecuación 1: (BUNGEY, 1989, PUNDIT MANUAL, 1994).

$$\text{(Ecuación 1)} \quad V = \frac{X}{T}$$

Donde:

V = velocidad da onda;

X = distancia entre los transductores (emisor e receptor de la señal);

T = tiempo de recorrido de la onda (μ s).

La velocidad de la onda depende principalmente de los siguientes factores: módulo de elasticidad, masa específica del concreto, porcentaje de vacíos, coeficiente de Poisson, y también de la presencia de armadura (BUNGEY, 1989, POPOVICS et al, 1995).

MENENQUETTI (1999) expone que los modos de transmisión de las señales son clasificados de acuerdo con el arreglo de los transductores. Cuando los pulsos son generados por transductores en caras opuestas, se clasifica como modo de transmisión directa; cuando están perpendiculares entre sí o en caras adyacentes, transmisión semi-directa y cuando los transductores están en el mismo plano se clasifica como modo de transmisión indirecta.

El método se fundamenta en el hecho de que la velocidad de propagación de las ondas es influenciada por la cualidad de la muestra. El ensayo consiste en la medición, por medio electrónico, del tiempo de propagación de ondas ultrasónicas a través del concreto, entre el emisor y el receptor.

Durante el ensayo por el modo de transmisión directa, la distancia entre los transductores puede ser fácilmente determinada, y el tiempo de recorrido de la onda ultrasónica es medida por el equipo del ensayo. Con estos dos valores (tiempo y distancia) puede ser calculada la velocidad de propagación de la onda:

MATERIALES UTILIZADOS

Los materiales utilizados para conformar la formulación de las mezclas asfálticas de esta investigación provienen de yacimientos localizados en el estado de Pará (Brasil), específicamente en su región Noreste y son descritos en los tópicos siguientes.

3.1. Triturado

El triturado utilizado en la elaboración de las placas utilizadas para el estudio pertenece a la suite intrusiva Tracuateua, compuesta por los cuerpos granitoides de Tracuateua (yacimiento Santa Mónica, de donde fueron retiradas las muestras), Mirasselvas y Tauari. Esta formación geológica aflora en el Cráton San Luiz, localizado en la Bacía de Paranaíba, siendo descrita en la carta geológica SA.23-V-C elaborada pela Companhia de Pesquisas em Recursos Minerales (CPRM, 2009), como: biotita-muscovita, sienogranitos asociados a diques sinplutónicos y aplitos de coloramento rosado, con granulación media a gruesa y presentan dureza de 7 (en la escala de 1 a 10 de Mohs). Dataciones

Tabla 1 Principales características del ligante asfáltico

Ensayo	Resultados	
Masa Específica (g/cm ³)	1.03	
Punto de ablandamiento anillo y bola	49.5°C (mín. 46.0°C)	
Penetración (25°C)	50.2 (0.1 mm) (mín. 50.0 (0.1 mm))*	
Índice de Pfeiffer y Van Doormaal (IP)	-1.2 (-1.5 a +0.7)*	
Viscosidad Saybolt-Furol	Temperatura (°C)	Tiempo (s)
	135	269 (mín. 141)*
	149	156 (mín. 50)*
	163	93 (30 a 150 para 177°C)

* Valores mínimos a ser atendidos, especificados en las respectivas normas.

radiométricas realizadas por ALMEIDA et al (1968), indican una edad aproximada de 1970 ± 60 millones de años, situando esta formación en la época Paleoproterozoica (BARRA, 2009).

3.2. Calcáreo

El depósito pertenece a la Formación Pirabas, que es un depósito del periodo Terciario (65 a 1,7 millones de años) compuesto por calcáreo fosilífero conteniendo, algunas veces rocas formadas por arcillominerales y margas (rocas compuestas por minerales carbonáticos y con 35% a 60% de arcilla). Sus afloramientos ocurren apenas en valles, cortes de carreteras y en frentes de trabajo, presentando dureza de 3 a 4 (en la escala de 1 a 10 de Mohs) (CPRM, 2009 apud BARRA 2009).

Del análisis macroscópica en muestras, este monzogranito se presenta como una roca ácida maciza con granulación média, pudiéndose observar que algunos fragmentos de esta roca ya se encuentran intemperizados con minerales sin brillo y quebrándose con aplicación de esfuerzo manual. La presencia de caolinita ya es un indicativo de la alteración química de los feldspatos presentes en esta roca (BARRA, 2009)

3.3. Ligante Asfáltico

Las muestras de ligante asfáltico fueron apoyadas por la refinería Lubrificantes y Derivadas de Petróleo del Noreste (LUBNOR), localizada en el Estado de Ceará. En la tabla 1 están presentadas las principales características del ligante asfáltico usado para la secuencia de ensayos.

PROCEDIMIENTO LABORATORIAL

Conforme a lo ya descrito, el ensayo de ultrasonido por el modo de transmisión directa consiste en localizar los transductores en caras opuestas de forma alineada y en posiciones fijas para obtener la medida de los tiempos de propagación de los pulsos.

Durante la realización de los ensayos es necesario un posicionamiento fijo de los transductores en las dos caras. Para tal fin, fue construido un molde que cumplía esta función de manera simple y segura, permitiendo ejercer presión sobre los transductores en el momento de las lecturas. El molde fue construido para un espaciamiento entre lecturas de dos centímetros tanto en la dirección horizontal como en la vertical.

Durante los ensayos, fue utilizado el transductor de 54kHz, por ser éste el más recomendado por la literatura para este ensayo.

El aparato usado para la medición de los tiempos de propagación de onda fue el PUNDIT 6.0 y las correspondientes velocidades fueron obtenidas por la ecuación 2.

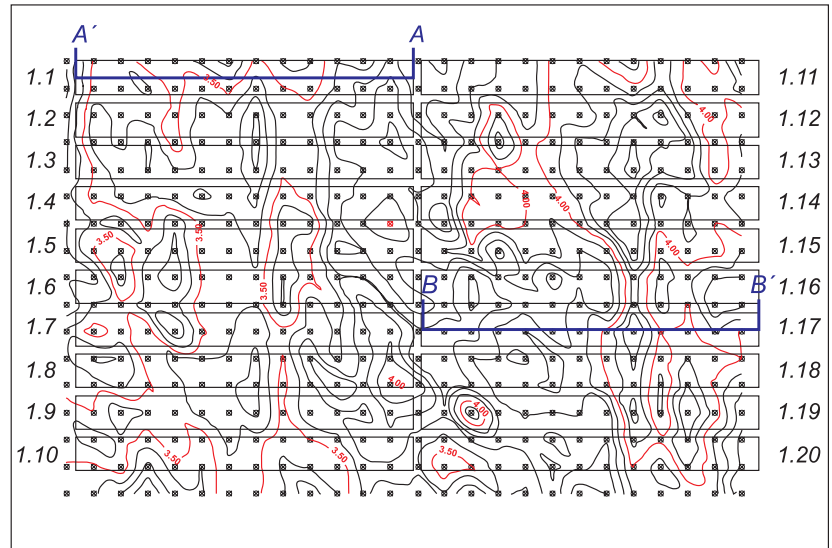
Con el objetivo de aumentar la precisión del ensayo y disminuir el margen de error del aparato de ultrasonido, fue evaluada la heterogeneidad de la superficie de la placa que podría influenciar en las medidas de los espesores. Para tal objetivo, fueron realizadas 3 mediciones por punto de medida de ultrasonido, utilizando el molde construido y un calibrador para trabajar con mayor exactitud. Debido a que el diámetro del transductor es mayor que el espaciamiento de 2cm (intervalo de medidas del molde), se trabajó con un valor medio del espesor obtenido durante las mediciones en

el área abracada por el transductor de 54kHz, cuyo diámetro es de 5cm. Este procedimiento fue adoptado para cada una de las 10 placas, de las cuales 5 placas con polvo de triturado (CTB) e 5 con polvo calcáreo (CTBPC).

Generalmente, durante la ejecución del ensayo de ultrasonido, la vaselina es usada como material acoplante, de manera de garantizar un mejor contacto del transductor con el cuerpo de prueba. Un aspecto con el cual no se contaba fue el efecto que este material causa en el cuerpo de prueba y la reacción presentada por el ligante ante el contacto con la vaselina. De alguna manera, la vaselina causa una desintegración del ligante que se traduce en la pérdida de liga de los agregados en la superficie influenciada por el acoplante. Se concluye entonces, que el uso de la vaselina no es adecuado para concretos asfálticos. En los ensayos definitivos fue empleada la bentonita mezclada con agua, la cual proporciona una pasta que con la dosificación apropiada asemeja la consistencia de la vaselina.

Antes de cada ensayo fue realizada la debida calibración del equipo con el uso de una barra de metal de referencia, la cual posee el tiempo de recorrido de onda conocido (25,7 μ s). Una vez realizadas las mediciones del espesor y del tiempo de recorrido de la onda ultrasónica para cada uno de los puntos fijados con el uso del molde, se calcularon las respectivas velocidades de propagación. Y con la finalidad de localizar las coordenadas de los tiempos y de las velocidades en los cuerpos de prueba, estas fueron asumidas en el centroide de cada cuadrícula del molde (figura 1). Fue establecido un origen con coordenadas 0,0 y a partir

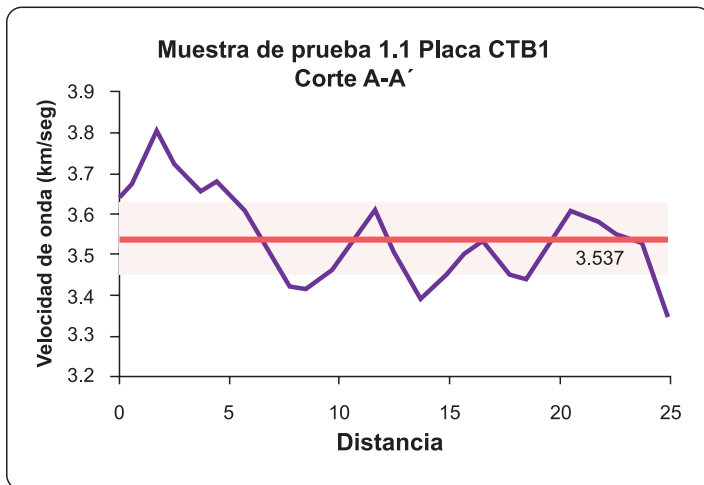
Esquema típico de localización de los cuerpos de prueba y curvas de igual velocidad **Figura 1**



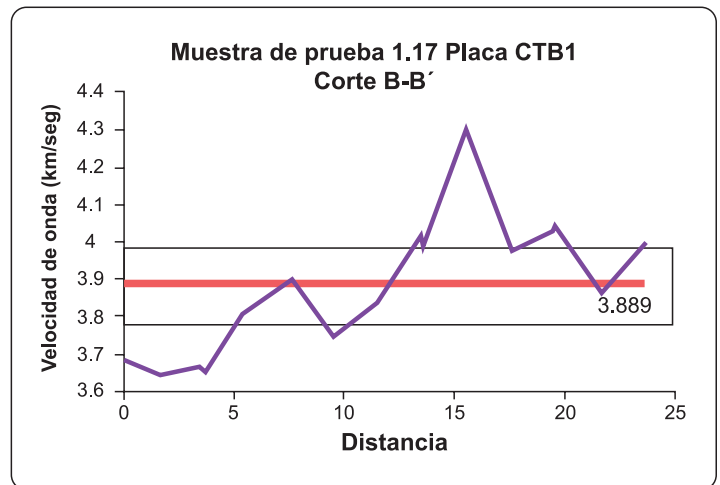
de este fueron obtenidas las demás coordenadas para las respectivas velocidades de recorrido de la onda ultrasónica. Este procedimiento fue seguido para todas las placas analizadas.

Asumiendo que las variaciones en el cuerpo de prueba irán a acontecer de una forma gradual, se buscó generalizar el comportamiento de la onda ultrasónica obteniendo curvas de igual velocidad de propagación. Para esto, fue utilizado un programa de topografía que usa las coordenadas de los puntos y sus cotas, representadas por los valores de las velocidades, para generar curvas de nivel (figura 1).

Cortes de velocidades en los cuerpos de prueba 1,1 (a) e 1,17 (b). **Figura 2**



(a)



(b)

Tabla 2 Resumen de los valores medios de las velocidades obtenidas para cada placa

PLACA	VEL. (km/seg.)	Desv. Est.	C. V.	PLACA	VEL. (km/seg.)	Desv. Est.	C. V.
CTB1	3.73	0.26	6.97%	CTBPC1	3.79	0.11	2.99%
CTB2	3.27	0.16	5.02%	CTBPC2	3.64	0.12	3.35%
CTB3	3.33	0.13	3.81%	CTBPC3	3.37	0.08	2.40%
CTB4	3.35	0.14	4.20%	CTBPC4	3.45	0.11	3.14%
CTB5	3.29	0.12	3.64%	CTBPC5	3.33	0.13	3.87%
MEDIA	3.39	0.24	7.11%	MEDIA	3.51	0.21	5.85%

Tabla 3 Resumen de las áreas para cada intervalo en cada placa

Intervalo	Área (%)									
	CTB1	CTB2	CTB3	CTB4	CTB5	CTBPC1	CTBPC2	CTBPC3	CTBPC4	CTBPC5
Inferior	37.9	23.5	17	21	18.9	14.1	19.6	9.5	12.5	15.1
Media	27.6	40.7	53.7	53.5	56	67.8	56.5	78.3	68.5	58.2
Superior	34.5	35.8	29.3	25.7	25.1	18.2	24	12.3	19.1	24.7

En la figura 1 se puede observar el comportamiento de la onda ultrasónica en cualquier posición en el cuerpo de prueba, además de permitir el análisis a lo largo de cualquier corte. En la misma figura fue construida una malla en tres dimensiones, con la finalidad de observar de manera más simple el comportamiento de la onda en el cuerpo de prueba. Este procedimiento fue seguido para cada una de las placas estudiadas.

La gran ventaja de este proceso, es que debido al hecho de conocer la localización previa de cada uno de los cuerpos de prueba trapezoidales en la placa inicial,

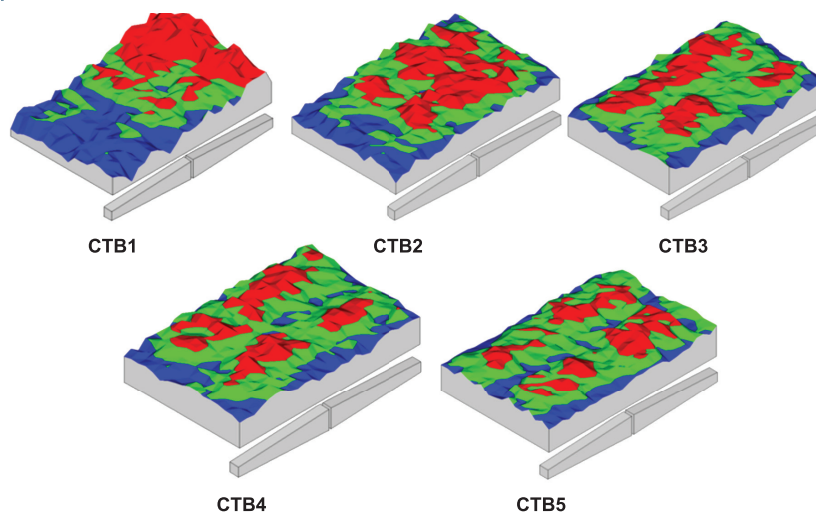
se puede estimar la velocidad media ultrasónica para cada uno de ellos mediante cortes en los gráficos.

Al final, para las 10 placas, se obtuvieron un total de 212 cuerpos de prueba y, por lo tanto, 212 cortes. En la figura 2, pueden ser observados los cortes A-A' para el cuerpo de prueba 1.1 y el corte B-B1 para el cuerpo de prueba 1.17 referentes a la figura 1, así como la media calculada para cada uno de ellos.

En la tabla 2 son presentados los valores medios de las velocidades de recorrido de la onda ultrasónica para cada placa. A partir de estos valores, fue establecido un intervalo llevando en cuenta el margen de error del equipo usado (2,5% aproximadamente). De esta manera, fueron obtenidos tres tipos de intervalo, el intervalo medio, el intervalo inferior y el intervalo superior como puede ser visto en las figuras 3 y 4. A partir de estas figuras (3 y 4) fue estimada para cada placa el área en porcentaje de cada uno de los intervalos, obteniéndose los resultados indicados en la tabla 3.

La figura 3 ilustra el isométrico del esquema de velocidades de los cuerpos de prueba correspondientes a las placas CTB y la figura 4 de las placas CTBPC. Las mismas figuras ilustran dos cuerpos de prueba trapezoidales para tener idea de su localización, que en el caso serían designados como 1.10 (inferior) y

Figura 3 Isométrico do esquema de velocidades para los cuerpos de prueba CTB



1.20 (superior) para la placa CTB1 y 1.10^a (inferior) y 1.20^a (superior) para la placa CTBPC3.

Después del corte de las placas, procedimiento a partir del cual son obtenidos los cuerpos de prueba trapezoidales ($B= 7\text{cm}$, $b=2,5\text{cm}$, $h=25\text{cm}$, $e=2,5\text{cm}$), fue determinado el porcentaje de vacíos de los mismos. El valor obtenido fue comparado con la velocidad de recorrido de la onda media obtenida para cada cuerpo de prueba trapezoidal, como presentado en la figura 5, con el objetivo de observar si existe alguna correlación.

Con el objetivo de presentar los valores de velocidad en cada cuerpo de prueba con su correspondiente porcentaje de vacíos, obtenidos para cada una de las placas agrupadas compuestas por polvo de brita (CTB) están representados en la figura 5 (a) y las compuestas por polvo calcáreo (CTBPC) en la figura 5 (b). Los valores de las correlaciones lineales referentes a los ajustes establecidos para cada una de las placas fueron muy bajos, conforme se muestra en la tabla 4.

CONCLUSIONES

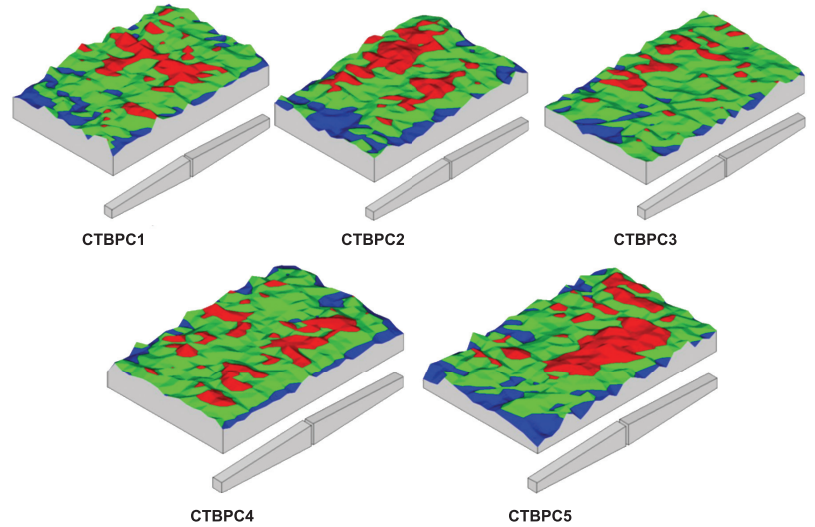
Aunque en los concretos de Cemento Portland el ensayo de ultrasonido para la determinación de la velocidad de recorrido de la onda presenta buenos resultados y buena aplicabilidad, en los concretos asfálticos existen muchas variables que intervienen en el comportamiento de la mezcla (curva granulométrica, tipo de ligante, aditivos, tipo de mineral, forma de los granos, temperatura, etc.), lo que dificulta la asociación de la velocidad de la onda ultrasónica con un patrón de comportamiento de la mezcla.

Según el estudio, la velocidad media obtenida para las placas CTBPC fue mayor a la obtenida para las placas CTB, sin embargo, esta diferencia no fue significativa y puede estar influenciada por el margen de error del equipo.

Aunque el área encontrada en el intervalo medio de los cuerpos de prueba sea mayor en las placas CTBPC que en las placas CTB, este hecho es debido únicamente al proceso de mezcla y compactación, siendo independientes de las propiedades del material analizado.

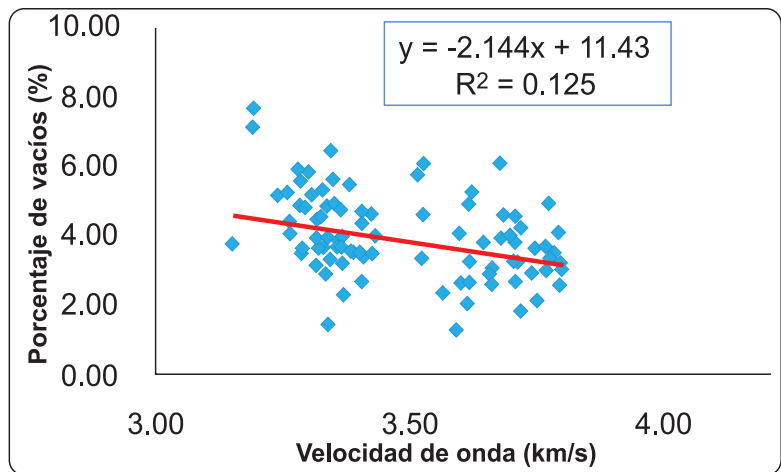
Llevándose en cuenta únicamente la velocidad de la onda como parámetro, la placa CTBPC3 fue la más homogénea. Sin embargo, con el uso de este resultado no podría ser hecha la selección de la placa, debido a

Isométrico del esquema de velocidades para los cuerpos de prueba CTBPC **Figura 4**

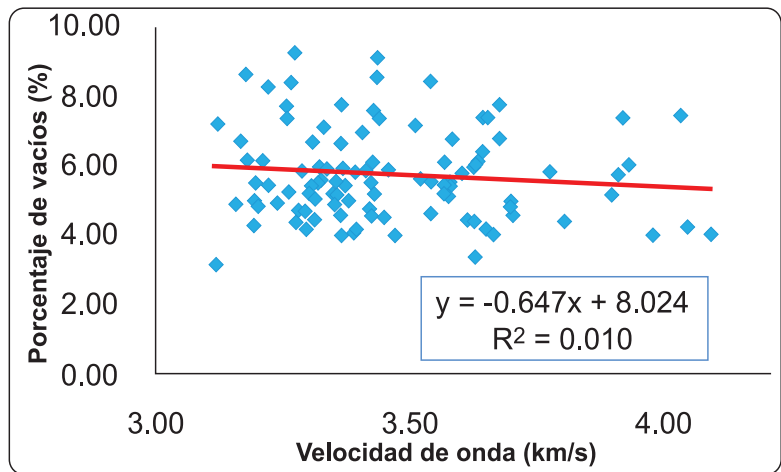


Regresión lineal para las placas: (a) CTB e (b) CTBPC

Figura 5



(a)



(b)

Tabla 4 Correlaciones encontradas para cada uno de los ajustes de las placas

PLACA	r ²	PLACA	r ²
CTB1	8.09%	CTBPC1	23.48 %
CTB2	16.76%	CTBPC2	20.80 %
CTB3	35.43%	CTBPC3	38.86 %
CTB4	15.43%	CTBPC4	15.91 %
CTB5	13.72%	CTBPC5	14.90 %
CTB	1.05%	CTBPC	12.58 %

que la elección de los cuerpos de prueba resultantes del corte de la misma corresponde a valores muy restrictos y el margen de variabilidad para la selección es muy pequeña.

En teoría, la velocidad de la onda ultrasónica disminuye con el aumento del porcentaje de vacíos en el cuerpo de prueba estudiado, debido a su menor propagación en el aire. Este hecho puede ser evidenciado en la gran mayoría de los gráficos comparativos entre porcentaje de vacíos y velocidad de la onda en la placa de los cuerpos de prueba trapezoidales.

Para el estudio de la homogeneidad de los vacíos (factor determinante en la selección de cuerpos de prueba trapezoidales), la velocidad de la onda medida por el ensayo corresponde a la media de las velocidades durante todo el recorrido de la onda, lo que quiere decir que pueden existir varias combinaciones de proporciones de materiales con la misma velocidad de onda ultrasónica, entre los materiales granulares, ligantes y vacíos.

Con el uso de ultrasonido por el modo de propagación directo (de la manera como fue aplicada en este estudio), se podría establecer un patrón para la evaluación de la homogeneidad usando el Coeficiente de Variación o el área localizada en el intervalo medio (usando el margen de error del equipo). Sin embargo, para efectos prácticos no podría ser usado en el proceso de selección de placas para los ensayos de fatiga y de módulo complejo, debido a que la elección que selecciona los cuerpos de prueba trapezoidales tienen patrones muy restrictos y el grado de precisión del ultrasonido no presenta tanta sensibilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **AFNOR NF T 98-250-2** – Preparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2 : Compactage des Plaques. Association Française de Normalisation, 1993.
2. **ALMEIDA, F. F. M. de, MELCHER, G. C., CORDANI, U. G., KAWASHITA, K., VANDROS, P.** Radiometric age determinations from northern Brazil. São Paulo: Boletim da Sociedade Brasileira Geológica, Vol. 17. 1968.
3. **BARRA, B.S.**, Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1999.
4. **BUNGEY, J. H.**, The testing of concrete in structures, 2 ed. London, Surrey University Press, 1989.
5. **CPRM (2009). MINISTÉRIO de MINAS e ENERGIA** - Serviço Geológico do Brasil. Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais. <http://www.cprm.gov.br>. Último acesso em abril de 2009.
6. **KLEIN, E. L. e MOURA, C. A. V.** Síntese geológica e geocronológica do Cráton São Luiz e do Cinturão Gurupi na região do Rio Gurupi (NE-Pará/NW-Maranhão). São Paulo: Revista Geologia, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Vol. 3. 2003.
7. **MENEGHETTI, L. C.**, Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através do ultrassom. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 1999.
8. **POPOVICS, J. S.; SONG, W.; GHANDEHARI, M.; SUBRAMANIAM, K.V.; ACHENBACH, J. D.; SHAH, S. P.**, Application of surface wave transmission measurements for crack depth determination in concrete. ACI Materials Journal, V97, N2, March-April 2000.
9. **Pundit Manual**, CNS Eletronics Ltd., London. 1994.
10. **STRECKEISEN, A. L.**, Classification of the common igneous rocks by means of their chemical composition: a provisional attempt. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte, H. 1976.