

Caracterización física y mecánica de un compuesto de mármol-cemento para uso alternativo en piso de casa-habitación

RESUMEN: El presente estudio tiene como propósito determinar el porcentaje de absorción, densidad, resistencia a la compresión y resistencia a la abrasión de una mezcla mármol-cemento para que pueda ser considerado como piso en casa-habitación. Se aplicó el procedimiento de la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004 para la fabricación de 12 probetas cilíndricas con dimensión de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura para los ensayos de absorción, densidad y compresión uniaxial; además, se fabricaron 12 probetas prismáticas con dimensión de 150X300X30 mm para el ensayo de abrasión. Para los ensayos de absorción y densidad se aplicó la norma NMX-C-263-ONNCCE-2010, para el ensayo de compresión uniaxial se aplicó la norma NMX-C-036-ONNCCE-2004 y para el ensayo de abrasión se aplicó la norma NTG 41087 h2. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la mezcla de mármol-cemento tuvo una absorción de 14.88%, una densidad de 1750 kg/m³, una resistencia a la compresión de 20.69 MPa y una resistencia al desgaste de 33 mm de ancho de huella. De acuerdo con los resultados obtenidos, esta mezcla cumple satisfactoriamente con la resistencia a la compresión mínima de 15 MPa requerida para pisos de concreto y con el desgaste máximo para un piso de casa-habitación.

PALABRAS CLAVE: Absorción, densidad, resistencia a la compresión, resistencia al desgaste, mezcla mármol-cemento, piso de casa-habitación.



Colaboración

Adolfo Manuel Morales Tassinari; Anai Rogel Flores; Jesus Joel Velazquez Toxtle, TECNM / Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez

ABSTRACT: This study has the purpose to determine the percentage of absorption, density, compressive strength and abrasion resistance of a marble-cement mixture so that it can be considered as floor in house-room. The procedure of standard NMX-C-159-ONNCCE-2004 was apply for the manufacture of 12 cylindrical specimens with a dimension of 100 mm in diameter and 200 mm in height for the uniaxial absorption, density and compression tests; also, 12 prismatic specimens with a dimension of 150X300X30 mm were manufactured for the abrasion test. For the absorption and density test, the standard NMX-C-263-ONNCCE-2010 was apply, for the uniaxial compression test, the standard NMX-C-036-ONNCCE-2004 was apply and for the abrasion test the standard NTG 41087 h2 was apply. The results obtained in this study show that the marble-cement mixture had an absorption of 14.88%, a density of 1700 kg/m³, a compressive strength of 20.69 MPa and an abrasion resistance of 33 mm of footprint. According to the results obtained, this mixture satisfactorily complies with the minimum compressive strength of 15 MPa required for concrete floors and with maximum wear for a house-room floor.

KEYWORDS: Absorption, compressive stress, desgaste stress, density, house-room floor, marble-cement mix.

INTRODUCCIÓN

Una de las principales actividades económicas del municipio de Tepexi de Rodríguez, Puebla, México es la extracción, transformación y venta de materiales pétreos naturales, debido a que existen canteras de travertino, lajas y mármol [1]. En este sentido, el tra-

vertino es una roca de calcita cristalina parcialmente porosa o celularmente estratificada de origen químico, formada por la precipitación de calcita en soluciones de agua calientes o tibias en el fondo de estanques poco profundos [2]; mientras que, la laja es una roca metamórfica de grano fino que presenta una escisión suave que permite que se divida en láminas delgadas [3]. Además, el mármol es una roca metamórfica que consiste predominantemente en calcita recristalizada (CaCO_3) y/o dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), que tiene una textura uniformemente cristalizada [4]. De la Figura 1a) a la Figura 1d), se muestran las fotografías de canteras del municipio de Tepexi de Rodríguez, Puebla, México:



Figura 1. a) Travertino tipo Puebla de la cantera de Morallillo; b) Travertino tipo Puebla de la cantera de El Ejido; c) Laja tipo Tlayúa de la cantera de Colonia Morelos; d) Mármol tipo Café Tabaco de la cantera de Agua de La Luna.

Existen empresas dedicadas a la extracción, transformación y venta de diversos tipos de piedras, que son extraídas de las diversas canteras. Estas empresas transforman la piedra mediante las siguientes etapas del proceso de transformación [5]: a) Extracción es el corte del material en cantera; b) Laminado es el corte en sierras de puente en planta; c) Retapado es la aplicación de un material para reforzar la lámina; d) Pulido es el desgaste de las placas con abrasivos para darles brillo; e) Segmentación es el corte de la lámina de acuerdo a las especificaciones; f) Secado es eliminar los residuos de agua; g) Empaque.

En este sentido, las empresas obtienen diversos productos tales como: láminas, tiras y pisos de diversos ta-

maños; sin embargo, este proceso de transformación provoca la generación de residuos en trozos o en lodo, y que después de recolectarlos, las empresas de la transformación van a tirarlos sus terrenos a cielo abierto provocando afectaciones al medio ambiente. Cabe mencionar que, no existe una cuantificación real de los residuos de la industria marmolera, pero se estima que es de entre un 30% a un 40% de la producción total; en la Figura 2, se muestran fotografías del desecho de la industria marmolera del municipio de Tepexi de Rodríguez:

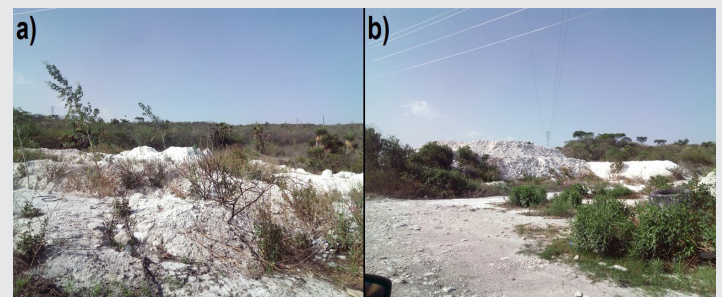


Figura 2. Desechos de la industria marmolera.

Se sabe que los residuos de la industria marmolera generan un impacto ambiental significativo debido a la acumulación de polvos y escombros. En este sentido, la fuerte contaminación del suelo se debe a la acumulación de polvo sobre la superficie donde es depositado el residuo; de esta manera, el suelo absorbe el óxido de calcio (CaO) del residuo que con el tiempo va provocando que el suelo en donde se encuentra se vuelva infértil y no permita el crecimiento de vegetación [6].

A nivel mundial, se realizan esfuerzos para mitigar los efectos negativos del residuo de la industria del mármol buscando alternativas para su uso; por ejemplo, se ha evaluado la efectividad del polvo inerte de piedras de mármol blanco como plaguicida mineral en el control de *Sitophilus zeamais*, en granos de maíz (de la variedad Tusón) [7]. En otro estudio, se confirmó la alta efectividad de la aplicación inicial de residuo de mármol y purines porcinos para iniciar la recuperación del ecosistema en suelo mineros desnudos [8]; incluso, se ha investigado que cementos con un menor contenido de Clinker que incorpora un 10% y 20% de lodos graníticos cumplen con los requisitos establecidos en la norma UNE-EN 197-1 para cementos CEM II/A [9].

También, se han realizado investigaciones para que el polvo del mármol proveniente de las etapas de corte y pulido puedan ser utilizados para la elaboración de bloques [10], para la obtención de adoquines [11], para la fabricación de ladrillos [12], para la producción de cerámicas como tejas y baldosas [13], para la preparación de morteros [14], para la realización de concreto autocompactante [15], y de concreto con fibra de acero [16]. Además, el polvo de mármol finamente molido es utilizado como un componente en pinturas, pasta de dientes y plásticos [17].

Es importante mencionar que, en México también se han realizado esfuerzos por utilizar el polvo del mármol; por ejemplo, se mejoró el comportamiento físico y mecánico usando el polvo del mármol y el mucilago del nopal en mezclas de mortero [18]. Además, los estudiantes del Tecnológico de Monterrey (ITESM) campus Puebla desarrollaron un concreto compuesto con cemento blanco, desecho de PET y polvo de mármol [19]. Cabe aclarar que, el concreto es el material resultante de la mezcla de cemento, agregados pétreos (arena y grava) y agua; además, se ha demostrado que la sustitución de arena y grava por residuos del mármol, hasta en un 75% de cualquier formulación, favorece a la disminución del contenido de aire atrapado y aumenta considerablemente la resistencia a la compresión [20].

El presente estudio tiene como finalidad determinar el porcentaje de absorción, la densidad, la resistencia a la compresión y la resistencia al desgaste de un compuesto a base de polvo de mármol del residuo de la industria marmolera de la localidad de Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, para que pueda ser considerado como piso de casa-habitación. Esta investigación resulta relevante debido que al obtener un producto a base de polvo e mármol que pueda ser utilizado en la elaboración de pisos para casa-habitación, mitigaría el impacto ambiental provocado por el residuo proveniente del proceso de corte de la industria marmolera de este municipio.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Laboratorio de Ciencias e Investigación en Materiales (LACIIM) del Centro de Competitividad y Tecnología para la Industria del Mármol del Estado de Puebla (CECOTIMEP) perteneciente al Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez. Para el estudio, se utilizaron los siguientes equipos y materiales: vernier análogo marca MITUTO modelo 530-312, pulidora marca MTI modelo UNIPOL-820, horno de secado marca MEMMERT modelo UP500, báscula digita marca METTLER TOLEDO modelo PB3002-S, báscula digital marca IBN modelo ECO-C150, máquina de compresión marca MATEST modelo SERVOPPLUS, contenedores de plástico con capacidad de 18 litros, polvo de mármol, cemento marca CRUZ AZUL, arena y agua.

Preparación de la Mezcla

Para el diseño de la mezcla se utilizó una relación de peso agua/cemento de 0.62 para tener una resistencia de diseño de 250 kg/cm². Se utilizó una mezcla de 30 kg en este estudio, la cual consistió de: 40% polvo de mármol (12 kg), 25% cemento (7.5 kg), 20% arena (6 kg) y 15% agua (4.5 kg). Para la preparación de la mezcla, se pesaron todos los compuestos con una báscula digital; de la Figura 3a) a la Figura 3), se muestran las fotografías del pesado de los compuestos de la mezcla:



Figura 3. Fotografías del pesado de los componentes de la mezcla: a) Agua; b) Polvo de mármol; c) Cemento; d) Arena.

Después de tener las proporciones adecuadas de los compuestos, de acuerdo con el procedimiento de la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004 [21], primero se realizó la mezcla entre la arena y el polvo de mármol hasta una combinación uniforme, después se adicionó y mezcló el cemento hasta una distribución uniforme y, por último, se agregó y mezcló el agua hasta obtener una mezcla homogénea. De la Figura 4a) a la Figura 4d), se muestran las fotografías del proceso para la obtención de la mezcla homogénea:



Figura 4. Obtención de la mezcla: a) Mezclado de arena, polvo de mármol y cemento; b) Vertido de agua; c) Mezclado; d) Mezcla homogénea obtenida.

Para la elaboración de las probetas, y de acuerdo con el procedimiento de la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004 [21], se colocó la mezcla homogénea dentro de los moldes en tres capas del mismo espesor. Al verter cada capa, se realizó el varillado donde se efectuaron 25 penetraciones con una varilla compactando cada capa en todo su espesor, permitiendo que la varilla penetrara la capa inmediata inferior. Finalmente, cada probeta fue enrazada para darle el acabado a la cara superficial; de la Figura 5a) a la Figura 5d), se muestra el proceso de elaboración:

Para el acondicionamiento de las 18 probetas, fue necesario lijar las probetas en las caras planas con una máquina pulidora utilizando lijas de grano 100, esto se realizó con la finalidad de que las probetas no tuvieran protuberancias para la realización de los ensayos. En la Figura 7, se muestran fotografías del lijado de las caras probetas:

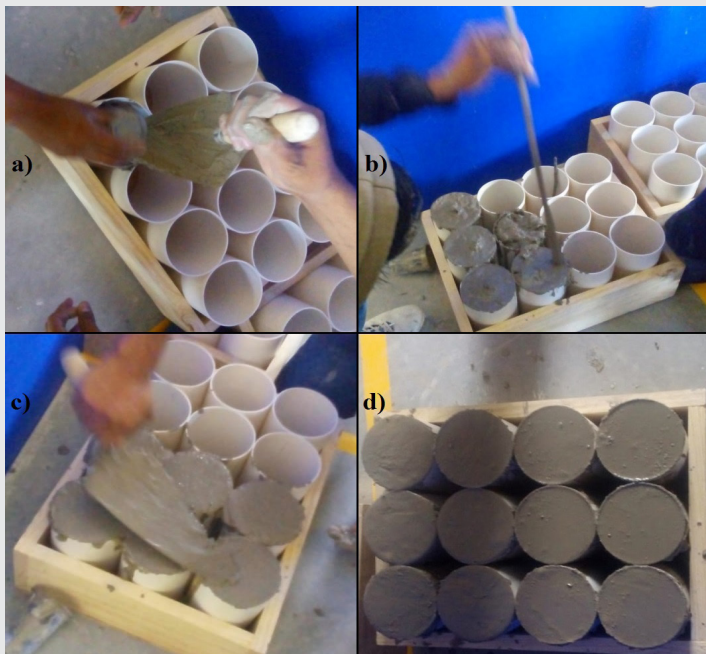


Figura 5. Elaboración de las probetas:
a) Vertido de la mezcla; b) Varillado de la mezcla; c) Razado de las probetas; d) Probetas terminadas.



Figura 7. Lijado de las caras de las probetas:
a) Probetas cilíndricas; b) Probetas prismáticas.

Después de haber elaborado las 12 probetas cilíndricas y las 6 probetas prismáticas, se dejaron secando dentro de un cuarto a temperatura ambiente durante 2 días; y pasado ese tiempo, fueron desmoldadas. Finalmente, las probetas desmoldadas se dejaron dentro de un cuarto a temperatura ambiente hasta completar 28 días para que fraguaran. En la Figura 6a), se muestra la fotografía de las 12 probetas cilíndricas fraguadas; mientras que en la Figura 6b), se muestra la fotografía de las 6 probetas prismáticas fraguadas:

Una vez que se lijaron las caras de las 24 probetas, se verificó con un vernier las dimensiones de las 12 probetas cilíndricas y de las 6 probetas prismáticas; en la Figura 8a) se muestra la fotografía de la medición de probeta cilíndrica; mientras que en la Figura 8b), se muestra la fotografía de la medición de una probeta prismática:

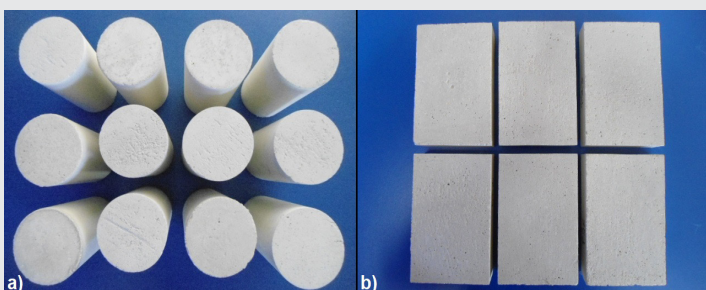


Figura 6. Probetas fraguadas:
a) Probetas cilíndricas; b) Probetas prismáticas.

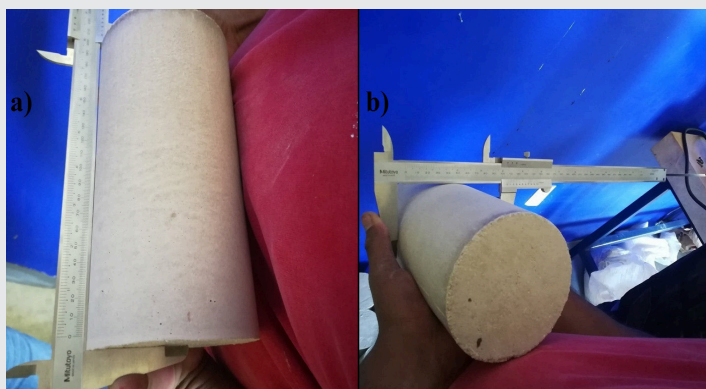


Figura 8. Fotografías de la medición de las probetas;
a) Probeta cilíndrica; b) Probeta prismática.

Ensayo de Absorción y Densidad

Para los ensayos de absorción y densidad se aplicó el procedimiento de la norma NMX-C-263-ONCCE-2010 [22], de esta manera, primero se precalentó

el horno a una temperatura de 60°C; una vez precalentado, 6 probetas cilíndricas de la mezcla mármol-cemento se introdujeron en el horno de secado y se secaron una temperatura de 60±2°C durante 96 horas hasta obtener peso seco constante. En la Figura 9a), se muestra una fotografía del horno precalentado; mientras que en la Figura 9b), se muestra una fotografía de las 6 probetas dentro del horno de secado:



Figura 9. Secado de las probetas cilíndricas:
a) Horno precalentado b) Probetas cilíndricas dentro del horno.

Figura 11, se muestra la fotografía de las 6 probetas cilíndricas sumergidas en agua potable:



Figura 11. Probetas sumergidas en agua potable.

Para garantizar que las 6 probetas cilíndricas se encontraran saturadas, se pesaron con una báscula digital cada 24 horas; por lo que, se obtuvo peso constante después de 96 horas. En la Figura 12a), se muestra la fotografía del peso saturado de la probeta PA02; mientras que en la Figura 12b), se muestra la fotografía del peso saturado de la probeta P06:

Para garantizar que las 6 probetas cilíndricas se encontraran en condición seca, se pesaron con una báscula digital cada 24 horas; por lo que se obtuvo, peso constante hasta las 96 horas. En la Figura 10a), se muestra la fotografía del peso seco de la probeta P02; mientras que en la Figura 10b), se muestra la fotografía del peso seco de la probeta P06:



Figura 10. Peso seco de las probetas cilíndricas:
a) Probeta P02; b) Probeta P06.



Figura 12. Peso saturado de las probetas cilíndricas:
a) Probeta P02; b) Probeta P06.

Finalmente, se realizó la pesada hidrostática de las 6 probeta cilíndricas para obtener su peso suspendido. En la Figura 13a), se muestra la fotografía del peso suspendido de la probeta P02; mientras que en la Figura 13b), se muestra la fotografía del peso suspendido de la probeta P06:

Después de obtener el peso seco, las 6 probetas cilíndricas se sumergieron en agua potable a una temperatura de 22±2°C para que se saturaran. En la

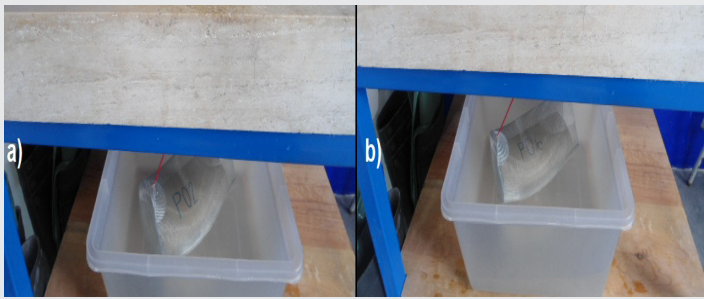


Figura 13. Peso suspendido de las probetas cilíndricas: a) Probeta P02; b) Probeta P06.

Ensayo de Compresión Uniaxial.

Para los ensayos de compresión uniaxial se aplicó el procedimiento de la norma NMX-C-083-ONC-CE-2002 [23]; para esto, cada probeta cilíndrica fue ubicada en la máquina de compresión, de tal forma que la probeta estuviera centrada en los dados. En la Figura 14, se muestran fotografías de la probeta P1 durante el ensayo de compresión uniaxial:

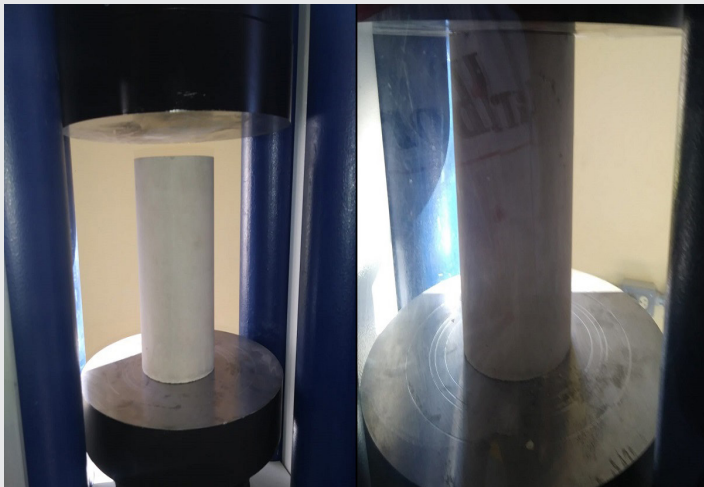


Figura 14. Probeta P1 en el ensayo de compresión.

Cabe mencionar que, la velocidad a la que fueron realizados los ensayos de compresión uniaxial fue de 3 kN/s a temperatura ambiente. En la Figura 15, se muestra la fotografía de las 6 probetas cilíndricas después del ensayo de compresión uniaxial:

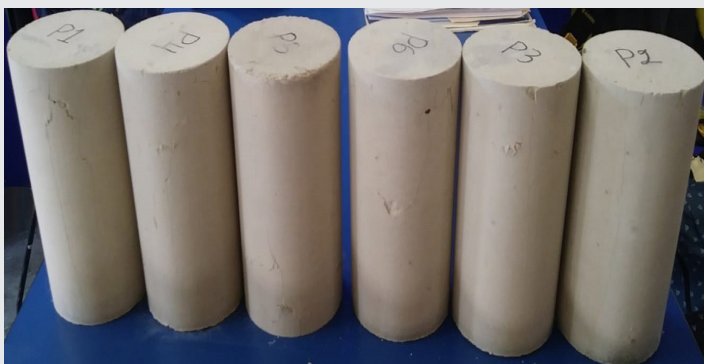


Figura 15. Probetas cilíndricas después del ensayo de compresión uniaxial.

Ensayo de Abrasión

Para los ensayos de abrasión se aplicó el procedimiento de la norma NTG 41087 h2 [24]; para esto, cada probeta prismática fue ubicada en la máquina de abrasión, de tal forma que la probeta estuviera centrada verticalmente en el disco. En la Figura 16, se muestran fotografías de las probetas P12 y P15 durante el ensayo de abrasión:

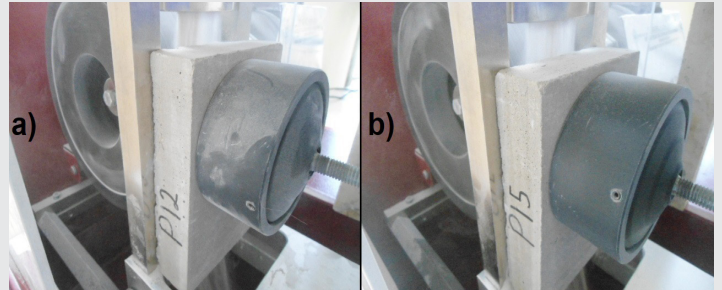


Figura 16. Probetas durante el ensayo de abrasión: a) Probeta P12; b) Probeta P15

Cabe mencionar que, la velocidad a la que fueron realizados los ensayos de abrasión fue de 75 rpm a temperatura ambiente. En la Figura 17, se muestra la fotografía de las probetas después del ensayo de abrasión:



Figura 17. Probetas después del ensayo de abrasión.

Finalmente, a cada probeta prismática se le mide el ancho de huella en el centro de la misma con un vernier; en la Figura 18, se muestra la fotografía de la medición del ancho de huella de la probeta prismática P11:

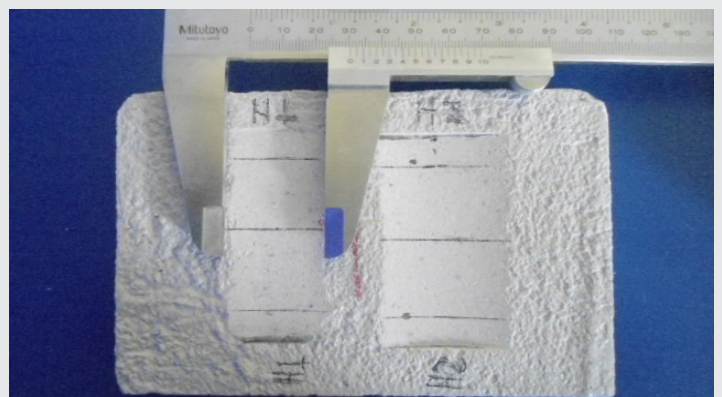


Figura 18. Ancho de huella de la probeta P11.

RESULTADOS

Resultados del Porcentaje de Absorción y Densidad De acuerdo con la norma NMX-C-263-ONCCE-2010, el porcentaje de absorción se calcula mediante la ecuación (1); mientras, la densidad se calcula mediante la ecuación (2):

$$A_A = \frac{A - B}{A} \times 100\% \quad \text{Ec (1)}$$

$$\rho = \frac{A}{B - D} \times 1000 \quad \text{Ec (2)}$$

En la Tabla 1, se muestran los resultados del porcentaje de absorción y de la densidad de la mezcla mármol-cemento:

Tabla 1. Resultados del porcentaje de absorción y densidad.

Núm. de Prob.	Peso Seco A (kg)	Peso Sat. B (kg)	Peso Susp. D (kg)	Porc. de Abs. A _A (%)	Dens. ρ (kg/m ³)
P01	3.180	3.620	1.810	13.84	1757
P02	3.200	3.640	1.820	13.75	1758
P03	3.160	3.600	1.790	13.92	1746
P04	3.200	3.680	1.840	15.00	1739
P05	3.200	3.660	1.830	14.38	1749
P06	3.260	3.720	1.860	14.11	1753
Promedio				14.17	1750
Desviación Estándar				0.42	6.58

Como se muestra en la Tabla 1, la mezcla mármol-cemento tuvo un porcentaje de absorción de 14.17% con una desviación estándar de 0.42%; además, una densidad de 1750 kg/m³ con una desviación estándar de 6.58 kg/m³. En la Figura 19), se muestra el diagrama de caja del porcentaje de absorción; mientras que en la Figura 20), se muestra el diagrama de caja de la densidad:

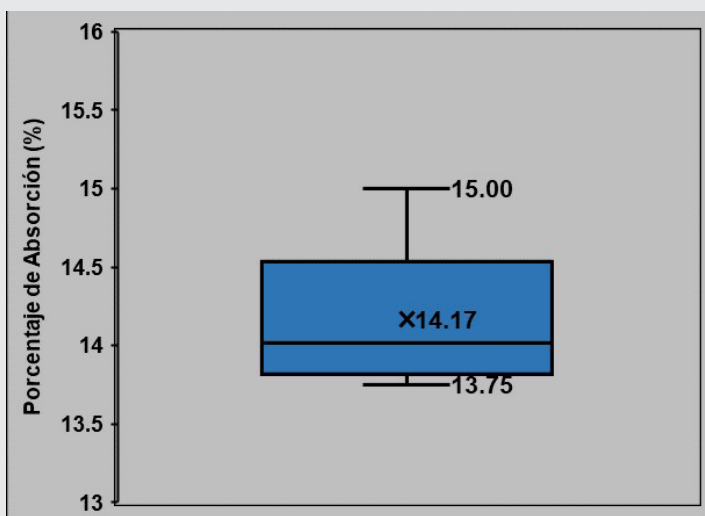


Figura 19. Diagrama de caja del porcentaje de absorción.

Cabe mencionar que, la densidad de 1750 kg/m³ de la mezcla mármol-cemento resulta que es comparable con una mezcla de concreto ligero que tiene

una densidad entre 1203 a 1845 kg/m³; por lo tanto, la densidad obtenida resulta conveniente, cuando se tiene que utilizar en una casa-habitación de dos pisos, debido a que la mezcla tendrá menor peso por unidad de volumen.

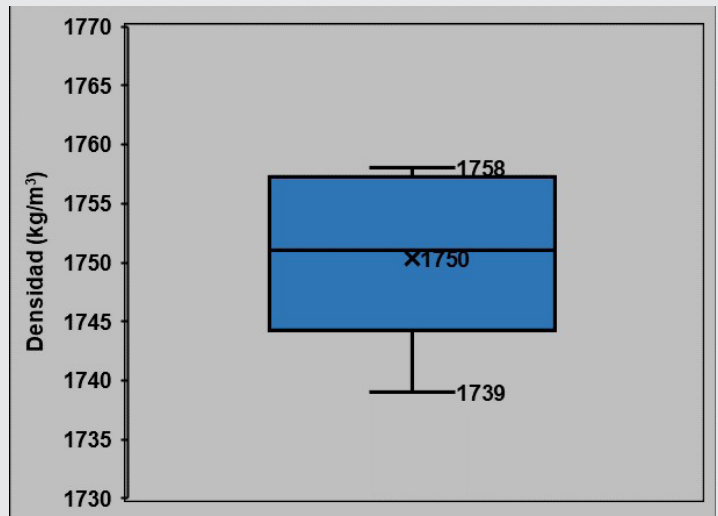


Figura 20. Diagrama de caja de la densidad.

Resultados de la Resistencia a la Compresión

De acuerdo con la norma NMX-C-083-ONCCE-2002, a partir de la carga de compresión (P) y del área de la sección transversal de compresión (A_C) se obtiene la resistencia a la compresión (S) mediante la ecuación (3):

$$S = \frac{P}{A_C} \quad \text{Ec (3)}$$

En la Tabla 2, se muestran los resultados de la resistencia a la compresión de la mezcla mármol cemento:

Tabla 2. Resultados de la resistencia a la compresión.

Núm. de Prob.	Carga de Compresión P (N)	Área de Compresión A _C (mm ²)	Resistencia a la Compresión S (MPa)
P01	195876	8659.015	22.62
P02	103693	8824.754	11.75
P03	201597	8824.734	22.85
P04	176353	8824.7544	20.37
P05	203957	8824.7544	23.11
P06	204815	8741.678	23.43
Promedio			20.69
Desviación Estándar			4.12

Como se muestra en la Tabla 2, la mezcla mármol-cemento tuvo una resistencia a la compresión promedio de 20.69 MPa con una desviación estándar de 4.12 MPa. En la Figura 21), se muestra en diagrama de caja de la resistencia a la compresión:

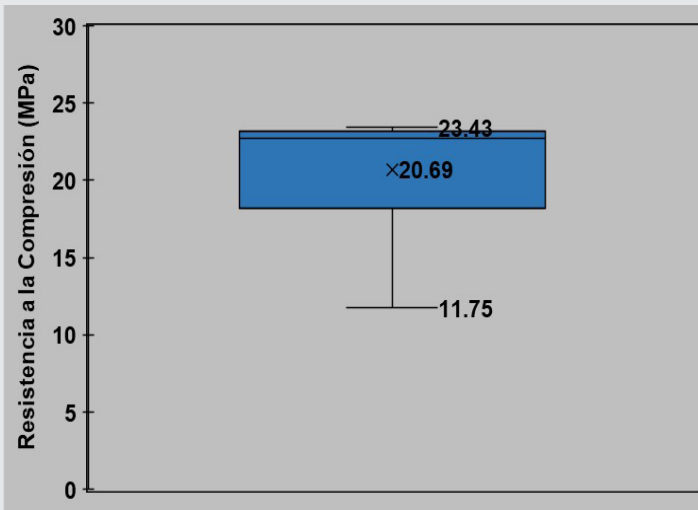


Figura 21. Diagrama de caja de la resistencia a la compresión.

Cabe mencionar que, la resistencia a la compresión obtenida de 20.69 MPa (211 kg/cm²) cumple con los parámetros mínimos en pisos de casa-habitación de 150 kg/cm²; por lo tanto, el uso como piso alternativo en casa-habitación resulta viable.

Resultados de la Resistencia al Desgaste

De acuerdo con la norma NTG 41087 h2, con los valores medidos de los dos anchos de huella medidos en cada probeta prismática, en la Tabla 3 se muestran los resultados de la resistencia al Desgaste de la mezcla mármol-cemento:

Tabla 3. Resultados de la resistencia al desgaste.

Núm. de Prob.	Ancho de Huella 1 (mm)	Ancho de Huella 2 (mm)	Ancho de Huella Promedio (mm)
P01	33	35	34
P02	33	33	33
P03	33	31	32
P04	35	33	34
P05	33	31	32
P06	33	31	32
Promedio			33
Desviación Estándar			2

Como se muestra en la Tabla 3, la mezcla mármol-cemento tuvo una resistencia al desgaste promedio de 33 mm con una desviación estándar de 2 mm. En la Figura 22), se muestra en diagrama de caja de la resistencia al desgaste:

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, la mezcla mármol-cemento tiene un porcentaje de absorción de 14.17%, una densidad de 1750 kg/m³, una resistencia a la compresión de 20.69 MPa y una resistencia a la abrasión con un ancho de huella de 33 mm. Cabe

mencionar que el concreto utilizado en pisos de casa habitación tienen una resistencia a la compresión de 15 MPa (150 kg/cm²) [25]. A decir, existen tres tipos de concretos: concreto de peso normal, concreto de peso ligero y concreto autocompactante; por lo que en la tabla 4, se muestran las propiedades de los tres tipos de concretos [26]:

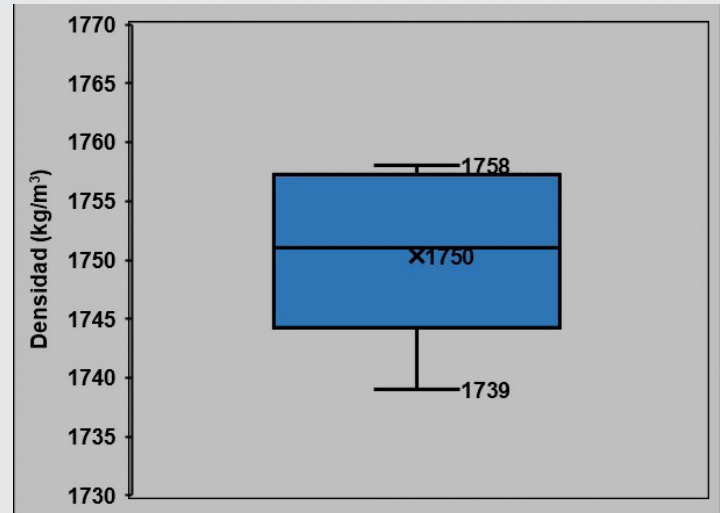


Figura 22. Diagrama de caja de la resistencia a la abrasión.

Tabla 4. Propiedades de los tres tipos de concretos.

Propiedad	Concreto de Peso Normal	Concreto Autocom.	Concreto de Peso Ligero
Resistencia a la Compresión Mínima f'_c (MPa)	15	15	15
Rango de Densidad en estado endurecido ρ' (KN/m ³)	22.7 – 23.5	22.7 – 23.5	11.8 – 18.1

En este sentido la mezcla de mármol-cemento que tiene una resistencia a la compresión de 20.69 MPa cumple con los parámetros de resistencia a la compresión de cualquier tipo de concreto; además, la mezcla de mármol-cemento que tiene densidad de 1750 kg/m³ cumple con el rango de densidad de un concreto ligero de 11.8 a 18.1 kN/m³ (1203 a 1845 kg/m³). Por lo que, se concluye que la mezcla de mármol-cemento cumple con requisitos para ser considerada como piso alternativo en casa-habitación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Panorama minero del Estado de Puebla. México: Servicio Geológico Mexicano, 2017.*
- [2] *Standard terminology relating to dimension stone, ASTM Standard C119-16, 2016.*
- [3] *Dimension Stone Design Manual Version VIII: Slate. USA: Marble Institute of America, 2016.*

- [4] Dimension Stone Design Manual Version VIII: Marble and Onix. USA: Marble Institute of America, 2016.
- [5] Coordinación General de Minería. "Estudio de la Cadena Productiva del Mármol". Subdirección de Cadenas Productivas. Dirección de Fomento y Organización. Dirección General de Desarrollo Minero. Coordinación General de Minería. Secretaría de Economía. México, (2015)
- [6] A. Santos; N. Villegas; J. Betancourt. "Residuo de mármol como insumo en la construcción civil - diagnóstico de la Comarca Lagunera". Revista de la Construcción, vol. 11 No.2, pp. 17-26. (2012).
- [7] Y. Rodríguez-Ledesma; R. Mirabal-García; C. Suárez-Pérez; M. García-González; A. Albert-Rodríguez; I. Orrantia-Cárdenas. "Control de Sitophilus zeamais Motschulsky con polvo de mármol en granos de maíz almacenados". Pastos y Forrajes, Vol.40, No. 4, pp. 296-301. (2017).
- [8] R. Zornoza; A. Faz; S. Martínez-Martínez; J. Acosta; M. Gómez-López; S. Avilés-Marín. "Marble waste and pig slurry increment soil quality and reduce metal availability in a tailing pond". Terra Latinoamericana, Vol. 31, No.2, pp. 105-114. (2017).
- [9] Gabriel Medina Martínez. "Reutilización de residuos industriales en el diseño de nuevos materiales eco-eficientes de base cemento. Aplicación en la Ingeniería Civil". Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. España, 2018.
- [10] F. Aukour. "Feasibility study manufacturing concrete eco-blocks using marble sludge powder as raw materials". Sustainable Development and Planning IV, Vol. 2, pp. 845-851. (2009).
- [11] O. Gencel; C. Ozel; F. Koksai; E. Erdogmus; G. Martínez-Barrerae; W Brostow. "Properties of concrete paving made with waste marble". Journal of Cleaner Production, No. 21, pp. 62-70. (2011).
- [12] K. Kartini; E. Norul; B. Noor; H. Ahmad. "Development of lightweight sand-cement bricks using quarry dust, rice husk and kenaf powder for sustainability". International Journal of Civil & Environmental Engineering, Vol. 12, No. 6, pp. 1-7. (2012).
- [13] Rubén Castaño Domene. "Propuesta de instalación para la recuperación de lodos procedentes del mecanizado del mármol". Trabajo de fin de Master. Universidad de Almería. España, 2011.
- [14] T. Kavas; A. Olgun. "Properties of cement and mortar incorporating marble dust and crushed brick". Ceramics-Silikáty, Vol. 52, No. 1, pp. 24-28. (2008).
- [15] P. Valdez; B. Barragán; I. Girbes; N. Shuttleworth; A. Cockburn. "Uso de residuos de la industria del mármol como filler para la producción de hormigones auto-compactantes". Materiales de Construcción, Vol. 61, No. 301, pp. 61-76. (2011).
- [16] M. Coutinho; A. Ramos. "Aplicação de um concreto fibroso fluido ecoeficiente". Construcción y Cemento. Investigación y Desarrollo, Vol. 6, No. 1, pp. 64-84. (2014).
- [17] Coordinación General de Minería. "Perfil del mercado del mármol". Subdirección de Cadenas Productivas. Dirección de Fomento y Organización. Dirección General de Desarrollo Minero. Coordinación General de Minería. Secretaría de Economía. México, (2016).
- [18] J. Betancourt; F. Cortés; J. Rentería; A. Díaz; M. Vaquera. "Comportamiento de mezclas de mortero con residuos de mármol (polvo), cáscara de nuez y mucílago de nopal". Revista de Arquitectura e Ingeniería, Vol. 13, No. 1. (2019).
- [19] A. Valdés. "Construir más con menos, un reclamo urgente para un mejor futuro". Construcción y Tecnología en Concreto, pp. 16-21. (2016).
- [20] H. Hebhouh; H. Aoun; M. Belachia; H. Houari; E. Ghorbel. "Use of waste marble aggregates in concrete". Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 3, pp. 1167-1171. (2011).
- [21] Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio - Método de Prueba, NMX-C-159-ONNCCE-2004, 2004.
- [22] Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico Endurecido - Determinación de la Masa Específica, Absorción y Vacíos, NMX-C-263-ONNCCE-2010, 2010.
- [23] Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto - Método de Prueba, NMX-C-083-ONNCCE-2002, 2003.
- [24] Métodos de Ensayo - Determinación de la resistencia al desgaste por abrasión de adoquines de concreto, NTG 41087 h2, 2012.
- [25] J. Carrillo; S. Alcocer; W. Aérador. "Propiedades mecánicas del concreto para viviendas de bajo costo". Ingeniería Investigación y Tecnología, Vol. XIV, No. 2, pp. 285-298. (2013).
- [26] Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto, NTC-C, 2017.