

APROXIMACIÓN A PESOS Y DENSIDADES DE MATERIALES DE FÁBRICA

Diego Miramontes de León¹

Resumen

El análisis de estabilidad de estructuras antiguas se hace, comúnmente, adoptando valores estandarizados de peso y resistencia de materiales poco conocidos, ya sea por la heterogeneidad de los mismos o bien por el deterioro que han sufrido después de siglos. En este trabajo se calcula el peso volumétrico de materiales caídos de estructuras históricas por problemas en la cimentación y humedad en uno de los casos y en otros dos casos, de templos afectados por los sismos del 2017. En el primero se trata de una parroquia en el estado de Zacatecas y en los demás, dos templos en el Estado de México. Debido a la irregularidad de las piezas, se recurre al principio de Arquímedes. El peso volumétrico obtenido para estas muestras representa una aproximación al estado actual del material después de estar sometido al paso del tiempo y/o cargas severas.

Palabras clave.- Peso volumétrico, Materiales de fábrica, Estructuras históricas, Modelo numérico.

Abstract

The stability analysis of old structures is commonly done by adopting standardized values of weight and strength of poorly known materials, either because of their heterogeneity or because of the deterioration they have suffered after centuries. In this work the volumetric weight of fallen materials of historical structures is calculated. This falling is due to foundation problems and humidity, in one of the cases and in the other two cases, of temples affected by the earthquakes of 2017. In the first, the samples were taken from a temple in the State of Zacatecas and in the others, of two temples in the State of Mexico. Due to the irregularity of the pieces, the Archimedes principle is applied. The volumetric weight obtained for these samples represents an approximation to the current state of the material after being subjected to the passage of time and/or severe loads.

Keywords.- Volumetric weight, Factory materials, Historic buildings, Numerical model.

Introducción

En un gran número de estructuras de fábrica dañadas por sismos, como los del año 2017, el análisis estructural se hace suponiendo valores estándar de peso y resistencia de materiales de sus diferentes elementos. Como ejemplo, en un modelo 3D como el de la figura 1 (Le Fichoux, 1998), se asumen características físicas homogéneas, elásticas e isotrópicas. Aunque se identifique el material y su peso común, las condiciones de exposición a través de los siglos pueden alterar el valor esperado. Para conocerlo, se estima el peso volumétrico para algunas muestras de materiales caídos en varios templos, entre ellos; la Parroquia de la Inmaculada Concepción en Jerez, Zacatecas, los templos de Guadalupe Xochiaca en Chimalhuacán y el de San Nicolás Tolentino en Malinalco, estos dos últimos en el Estado de México.

¹Profesor jubilado del programa de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Actual Consejero del Colegio de Ingenieros Civiles de Zacatecas A.C. diego.miramontes@gmail.com

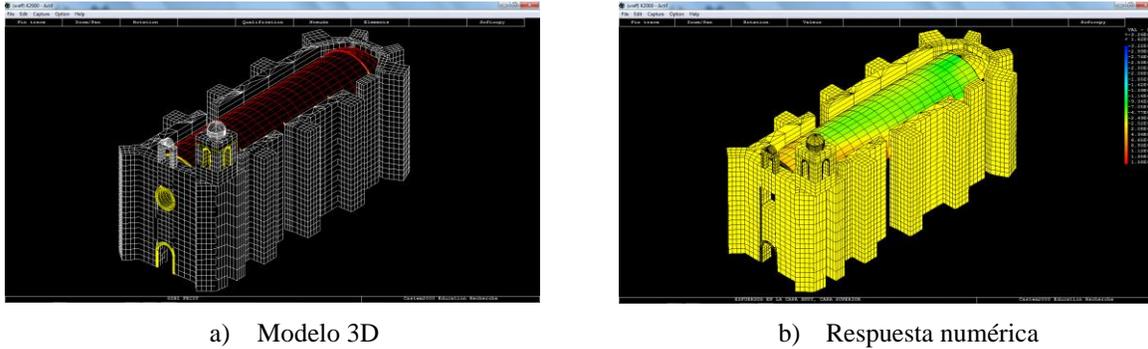


Figura 1.- Modelo de San Martín Caballero, Huaquechula, Puebla con CASTEM2000.

En el caso Jerez, se recuperó material al pie de una columna E3 (imagen 1a y 2a). Se tomaron dos piezas (J1 y J2) y una tercera como material de sustitución (J3). Se estima que las dos primeras corresponden al material de la bóveda, principalmente en su arranque interior, mientras la tercera corresponde a una pieza de cantera con la que se substituyen los sillares. Para el estado de México se tienen muestras del Campanario de Guadalupe Xochiaca (M1) y dos para San Nicolás en Malinalco (imagen 1b). En este último caso, (M2) corresponde al material original, mientras (M3) es la nueva cantera con la que se reconstruye una de las pilastras del campanario (imagen 2b). Conviene agregar que dos de las pilastras del segundo cuerpo del campanario fueron severamente dañadas. La imagen 1b corresponde a una de ellas, la cual quedó destruida a punto de colapso.

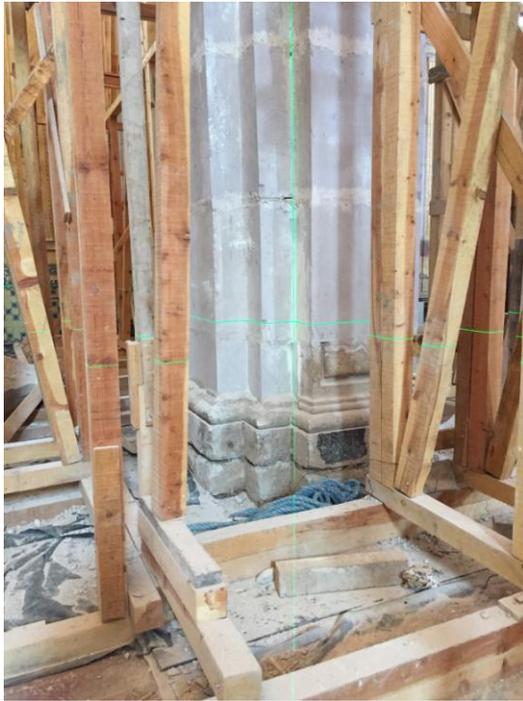
Objetivo

Calcular el peso volumétrico de muestras de material de fábrica alterado por el paso del tiempo y por condiciones extremas de trabajo.

Justificación

Durante el análisis de estabilidad de las estructuras de fábrica es necesario adoptar valores comunes de las propiedades de los materiales utilizados. A la alta heterogeneidad del mismo material se agrega el desconocimiento de los materiales utilizados en su construcción o para el remplazo en intervenciones posteriores. Una vez que se presenta un derrumbe se descubre, primero, qué tipo de material se tiene y segundo, en qué condiciones físicas se encuentra. Este dato no necesariamente se repite para el derrumbe de otra parte de la estructura. Por lo tanto, para generar un modelo numérico, se parte de características comunes observadas en otros casos analizados o se asumen los valores teóricos típicos como peso volumétrico y resistencia a compresión (véase la figura 1). Para la zona colapsada no hay mucho problema, el elemento estructural ya no existe, así que se deberá remplazar, mientras que para los elementos que permanecen en pie, es posible que siga ocultando el material del que están hechos y las condiciones en las que quedó. Para el caso San Martín, la bóveda sufrió varios derrumbes.

Con el propósito de lograr una aproximación al peso de algunos materiales caídos, se realizó este estudio básico, sin pretender aplicar técnicas ni equipos sofisticados, pero que puede ser suficiente para comparar los valores típicos con los que es posible encontrarse en estructuras de este tipo, sin suponer que puedan generalizarse. Es decir, los resultados siguen siendo válidos sólo para los casos analizados.



a) Parroquia, Jerez



b) San Nicolás, Malinalco (CONACER, 2019)

Imagen 1.- Elementos con desprendimientos de material.

Materiales y métodos

Debido a la irregularidad de las muestras (imagen 2), el peso se estimó por medio del principio de Arquímedes. El volumen desalojado se obtuvo considerando la diferencia de niveles (imagen 3a) o por medio de un dispositivo simple (imagen 3b), dependiendo del tamaño de las muestras. Otra forma de verificar el peso, fue comparando los estados saturado y seco, entendiendo por el segundo, con el contenido de humedad que pudiera absorber del medio ambiente y sin exposición a lluvia.



a) Muestras Jerez, Zac.



b) Muestras Edo de México

Imagen 2.- Muestras de material

Para obtener el peso "seco", previamente se guardaron las muestras durante cuatro semanas a temperatura y humedad en ambiente cerrado, es decir, entre 14°C a 20°C para la primera y de

40% a 80% para la segunda, según el clima. Después se pesaron tal cual, esto es, con la humedad relativa que contenían, considerando que es el peso que se mantiene en la estructura.



Imagen 3.- Dispositivos de medición

Resultados y discusión

La tabla 1, resume los valores encontrados donde se observa que el promedio entre el estado seco y saturado para el caso Jerez, es próximo a $1.60T/m^3$ y para la cantera de sustitución en Malinalco apenas supera las $2.00T/m^3$. La imagen 4 es un ejemplo del peso de la muestra seca y saturada.



Imagen 4.- Peso de muestra seca y saturada.

Tabla 1.- Peso volumétrico γ de muestras de Jerez y Estado de México.

Muestra	W_s gr	W_h gr	Vol ml	γ_s T/m ³	γ_h T/m ³	γ_p T/m ³
J ₁	12.5	17.6	10	1.240	1.760	1.500
J ₂	34.6	41.7	22.5	1.529	1.853	1.691
J ₃	283.8	337.2	203	1.393	1.661	1.527
M ₁	121.0	127.3	74.0	1.634	1.720	1.677
M ₂	186.2	220.5	117.5	1.580	1.876	1.728
M ₃	238.7	268.9	125.0	1.906	2.151	2.019

γ_s -peso seco, γ_h -peso saturado, γ_p -peso promedio

Para efectos de análisis estructural, el valor mínimo a considerar es el peso saturado, además de tomar en cuenta que, por lo general, la composición de elementos estructurales incluye diversos materiales que pueden incrementar el peso real. No conviene descartar la posibilidad de que el material se sature por filtraciones propias de impermeabilizaciones dañadas. En todo momento a lo largo de la vida útil de estas estructuras, pueden ocurrir cambios en la exposición de los elementos estructurales, además, de que como se ha visto en muchos casos, no se conocen con precisión las condiciones reales del material de fábrica.

Densidad del agua

Para calcular el volumen de las muestras se recurrió a obtener el volumen de agua desalojado. El peso de ese volumen también puede ofrecer información sobre la muestra, ya que podría corresponder al volumen que se desea calcular, sólo que para ello se necesita determinar la densidad del agua. El valor estándar que se da al agua es de 1.00T/m³, sin embargo ese valor cambia según la temperatura del agua y según la presión atmosférica, por lo que depende del lugar y del día que se mida. Para Zacatecas, el día de la prueba, la presión atmosférica que se tuvo fue 1025hPa. Además la temperatura fue próxima a 20°C. Para esos valores y aplicando la fórmula desarrollada por Tanaka et al (2001), la densidad del agua se calcula con la ecuación (1) :

$$\rho_{CCM} = \left\{ a_5 \left[1 - \frac{(t + a_1)^2 (t + a_2)}{a_3 (t + a_4)} \right] + C_{ad} \right\} \cdot F_c \quad (1)$$

El factor por aire disuelto en el agua se obtiene con la ecuación (2) y el factor de corrección por compresibilidad con la ecuación (3).

$$C_{ad} = S_0 + S_1 \cdot t \quad (2)$$

$$F_c = \left[1 + (K_0 + K_1 \cdot t + K_2 \cdot t^2) (p - p_0) \right] \quad (3)$$

Los valores de los parámetros a , K , p_0 y S se muestran en la tabla 2. Además, t corresponde a la temperatura en °C y p a la presión atmosférica en Pa como datos.

Tabla 2.- Parámetros para el cálculo de la densidad del agua (Centeno et al, 2004)

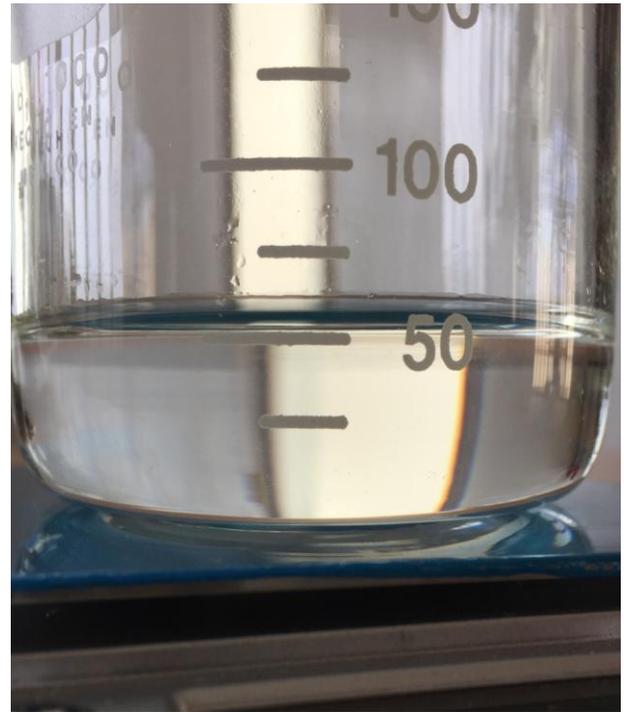
Parámetro	Valor	Unidades
a_1	-3,983 035	°C
a_2	301,797	°C
a_3	522 528,9	°C ²
a_4	69,348 81	°C
a_5	999,972	kg·m ⁻³
p_0	101 325	Pa
K_0	$50,74 \times 10^{-11}$	Pa ⁻¹
K_1	$-0,326 \times 10^{-11}$	°C ⁻¹
K_2	$0,00416 \times 10^{-11}$	Pa ⁻¹ ·°C ⁻²
S_0	$-4,612 \times 10^{-3}$	kg·m ⁻³
S_1	$0,106 \times 10^{-3}$	°C ⁻¹

Para p y t dados antes, se obtuvo $C_{ad}=-0.002492$ y $F_c=1.00000031$. La corrección por compresibilidad prácticamente es 1.0, pero se adoptó el resultado completo para calcular ρ_{CCM} , con lo que resultó en 997.308 kg/m^3 , es decir, $0.997 \text{ gr/ml}=0.997 \text{ gr/cm}^3$. La corrección con respecto al valor común de 1 gr/cm^3 es de 0.3%. Esto implica que, por densidad del agua, la diferencia en peso de las muestras sería pequeña. Es decir, $\pm 3 \text{ kg}$ por cada Tonelada.

La ecuación (1) fue programada en Octave (Eaton et al. 2018) y la curva para valores de -10°C a 30°C y -10°C a 100°C se grafica en la figura 2. De vaxasoftware.com (2007), para $t=20^\circ$ y el mismo valor de p , se tiene $\rho=998.29 \text{ gr/cm}^3$. El inconveniente de Centeno et al (2004) es que no incluye ningún valor de la densidad, si no sólo presenta la diferencia de valores de la ecuación (1) con otros procedimientos experimentales. Sin embargo, las gráficas permiten ver una buena aproximación con el valor conocido de la densidad del agua a 1 gr/cm^3 para una $t=4^\circ\text{C}$ o 5°C . También se observa que para $t=20^\circ$ ambas densidades están muy próximas, con una diferencia de 0.098%, es decir, mucho menor al 1%. Por último, también se tiene buena aproximación con la densidad conocida para 100°C , es decir, 958 kg/m^3 .

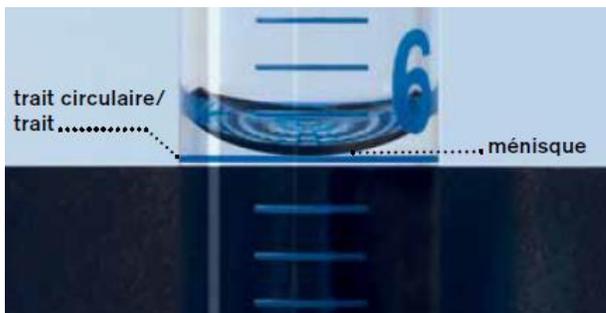


a) 5ml con jeringa

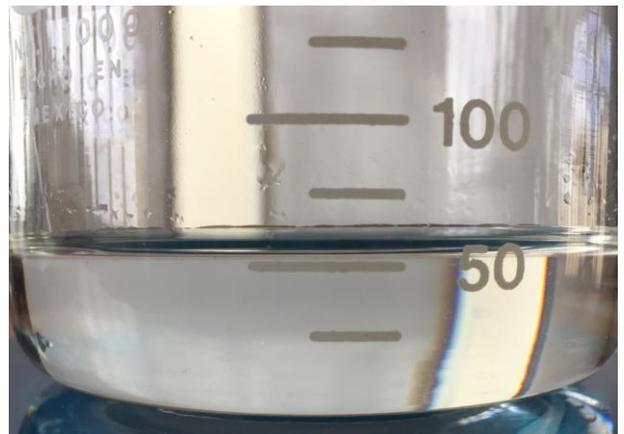


b) 50ml en vaso de precipitado

Imagen 5.- Estrategias para pesar el agua.



a) Como leer el nivel del agua (Brand, 2015)



b) Vaso de precipitado con 50gr

Imagen 6.- Altura del menisco.

En resumen, la diferencia que se pueda obtener para la definición de la densidad del agua, no representa un cambio importante en el cálculo del peso volumétrico. Aún así, puede considerarse, para mayor conveniencia, un ajuste del 10% en los valores dados en la tabla 1. Los valores de los pesos volumétricos saturados e incrementados en 10% se muestran en la tabla 3. Para enfatizar el carácter heterogéneo y la impredecible composición a priori de los materiales de fábrica, se incluye la imagen 7, caso similar al de muchas de estas estructuras.

Tabla 3.- Pesos volumétricos máximos modificados

Muestra	γ_{hm} T/m ³
J1	1.936
J2	2.034
J3	1.827
M1	1.892
M2	2.064
M3	2.366



Imagen 7.- Material de fábrica en Templo Parroquial de San Cosme y San Damián, Villa de Cos, Zac.

Conclusión

Para el análisis de estabilidad de la estructuras de fábrica, el peso de los materiales es el actor principal de las cargas que actúan sobre ellas. Ya sea el peso propio o la carga lateral debida a sismos dependen de este valor. En este trabajo, se analizaron varias muestras tomadas de estructuras que sufrieron daños en algunos de sus elementos estructurales. El peso volumétrico obtenido para estas muestras, representan una aproximación al peso correspondiente a las condiciones actuales de estos templos. Por lo general, el material ha estado sometido al envejecimiento, intemperismo, flora, fauna y sobrecargas.

El valor estándar aplicado, por el autor de este trabajo, en el análisis de este tipo de estructuras como la de la figura 1, ha sido de $2.6T/m^3$, por lo que se considera que se guarda un margen de seguridad adecuado ante la incertidumbre del material. A excepción de M3, los materiales degradados, apenas rondan las $2.0T/m^3$ lo que refuerza el margen de seguridad mínimo para este tipo de estructuras de valor arquitectónico, cultural e histórico. El empleo de programas de elementos finitos ofrecen información aproximada al comportamiento estructural de estas construcciones y deben utilizarse como referencia, ya que las propiedades mecánicas de los materiales deben homogeneizarse y no es fácil cuando además, se desconoce su composición.

Agradecimientos

La fórmula de la densidad y sus gráficas, fueron programadas por Gerardo Miramontes de León, por lo que se agradece su trabajo, comentarios y revisión a este documento. También se agradece al Centro INAH Puebla y a la Arq. Teresita Miravete Barrios por la información planimétrica del templo y antiguo convento de San Martín Caballero en Huaquechula, Puebla con la que se generó la figura 1. Finalmente se agradece a los Profesores Alain Millard, del Comisariado de Energía Atómica en Saclay y Jean Marie Reynouard del INSA-Lyon, ambos en Francia, por el permiso para el uso del programa Castem2000 (Le Fichoux, 1998).

Referencias

- Brand GMBH + Co KG.- (2015). *Manuel pour travailler avec des appareils de laboratoire. Informations sur la mesure de volumes*. P.O. Box 11 55, 97861 Wertheim/Main· Germany. 48P.
- Centeno L. Ma., Burgos L del C., Becerra L.O., (2004).- Determinación de la densidad del agua tipo I ASTM utilizada en CENAM con patrones sólidos de densidad. Centro Nacional de Metrología. Simposio de Metrología, 8p. (NOTA:CCM-Comité Consultivo de Masa).
- Constructores CONACER, S.A. de C.V. (2019).- Proyectos diversos en el Estado de México y Morelos.
- Eaton J.W. et al. (2018).- GNU Octave, version 4.4.1. This is free software.
- Le Fichoux E., (1998). Castem2000, Thematic classification of annotated testing files. ENSTA – LME. 376p. También en, Le Fichoux E., (1998), Présentation et utilisation de Castem2000, ENSTA-LME, 102p.
- Tanaka M., Girard G., Davis R., Peuto A. and Bignell N.- (2001), Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports, Metrología, Vol. 38, 2001, 301-309.
- www.vaxasoftware.com (2007).- Chemical tables and formulae. SOFTWARE EDUCATIONAL RESOURCES. Copyright © 2007-2020.