

CODE 474

IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA PIEDRA DE SAN CRISTOBAL MEDIANTE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS.

**Baeza, Juan R.¹; Compán, Víctor^{2*}; Cámara, Margarita³; Pachón, Pablo⁴;
Castillo, German⁵**

1: Departamento de Construcciones Arquitectónicas II
Universidad de Sevilla
email: jbaeza@us.es

2-4: Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno
Universidad de Sevilla.
2: e-mail: compan@us.es
3: e-mail: mcamara@us.es
4: e-mail: pachon@us.es

5. Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación
Universidad de Málaga
e-mail: gcastillo@uma.es

PALABRAS CLAVE: Construcción histórica de fábrica; técnica no destructiva; Piedra de San Cristóbal; propiedades mecánicas.

RESUMEN

La alteración de la Piedra arenisca es una inquietud para los técnicos y restauradores del patrimonio histórico, ya que es la piedra base de muchos edificios de nuestro patrimonio histórico. En este trabajo nos vamos a centrar en la piedra extraída en el Cerro de San Cristóbal, situada en el Puerto de Santa María (Cádiz). Una de las características de esta piedra es un material muy degradable, que unido a las alteraciones provocadas por el paso del tiempo y por los agentes atmosféricos están poniendo en peligro parcial o totalmente algunos de los edificios históricos más importantes de nuestra región.

El objetivo de este trabajo consiste en contribuir a la caracterización mecánica de la piedra del Cerro de San Cristóbal, utilizando métodos físicos y geofísicos. Para desarrollar este trabajo contamos con una serie de probetas pertenecientes a la Iglesia de Santiago de Jerez de la Frontera, las cuales se han obtenido extrayendo varios testigos en el sentido paralelo al eje de las columnas.

La caracterización de sus propiedades físicas se ha centrado en la determinación de su densidad, (seca, sumergida y saturada), porosidad abierta, absorción, volumen de poros, volumen aparente, mientras que sus propiedades mecánicas se ha determinado mediante ensayos dinámicos, determinando su módulo de deformación identificando sus frecuencias naturales de vibración.

Dicha campaña dinámica se ha realizado a diferentes niveles de humedad seca 0%, y saturadas al 40%, 80% y el 100%. La identificación de sus propiedades mecánicas se ha realizado basándonos en la norma UNE 14146.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción histórica

La Sierra de San Cristóbal, situada al suroeste de la provincia de Cádiz, es un pequeño promontorio que separa Jerez de la Frontera y el Puerto de Santa María y fue utilizada como cantera desde la época fenicia. El nombre lo recibe de una pequeña ermita, hoy desconocida, que parece ser que estaba situada cerca del lugar de extracción de la piedra. La sierra se sitúa en el extremo oeste de la Cordillera Penibética. Es el resultado del depósito de sedimentos calizos en el terciario, además de una serie de materiales silíceos arrastrados por el Guadalete¹.

La Sierra de San Cristóbal es una formación del plioceno superior constituida por calcarenitas, que son areniscas fosilíferas de grano medio-grueso compuesta de restos fósiles y algas rojas y en menor proporción granos de cuarzo, con cemento calcáreo (sílice) que presentan distinto grado de cohesión. Presentan óxidos de hierro, lo que le da esa tonalidad ocre- amarillenta. Es blanda y deleznable, los granos se desprenden por simple rozamiento².

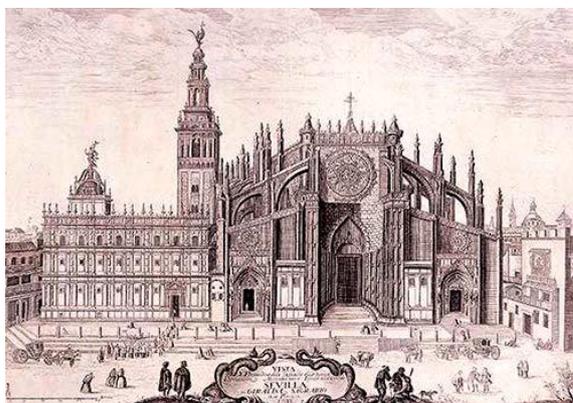


Figura 1: Grabado de la catedral de Sevilla del s. XVIII.

Tradicionalmente, los canteros las dividían en dos tipos: la piedra dura o ‘palomera’, y la piedra blanda o ‘franca’. La más buscada, lógicamente, era la dura por su mayor resistencia, pero presentaba el inconveniente de ser más difícil de extraer y de labrar. También era más difícil de encontrar dentro de los estratos, al encontrarse alternada con la piedra blanda. El precio de esta piedra dura se encarecía mucho³.

Dicho material se lleva explotando mediante sucesivas canteras que llevan siendo utilizadas desde hace unos 5.000 años, está documentado que con esta piedra se levantaron los zócalos que sustentaron las cabañas de los poblados de la Edad del Cobre de Las Beatillas y La Dehesa (actual término municipal del Puerto de Santa María), los monumentos funerarios, hipogeos y tumbas de sus necrópolis, las ciudades fenicio-púnicas de Doña Blanca y de su acrópolis de Las Cumbres, las villas y alfares romanos, la población andalusí de Siduna, las torres y ermitas cristianas.

De esta cantera se extraía la piedra utilizada para los principales edificios que surgieron entre los siglos XVI y XVIII en las ciudades más próximas: Jerez de la Frontera, Sevilla y el Puerto de Santa María, por su fácil extracción y alta manejabilidad. También por su facilidad a la hora del suministro, se transportaba desde el Puerto de Santa María hasta Sevilla por el Río Guadalquivir y desembarcaba en el muelle, junto a la Torre del Oro⁴.

En los últimos cincuenta años, las **calcarenitas** (arenisca calcárea) de la Sierra de San Cristóbal han proporcionado el material que se ha usado como sub-base para la construcción de carreteras. El gran

foso que dejaron las más cercanas a Jerez está siendo utilizado desde hace dos décadas como vertedero de residuos de obra.

1.2 Importancia de la piedra en el patrimonio.

El material que se estudia en este proyecto se encuentra en muchos edificios religiosos, militares y civiles: en la provincia de Sevilla y Cádiz, como la Catedral de Sevilla, la Iglesia del Salvador, el monasterio de San Jerónimo de Buenavista. En la provincia de Cádiz tenemos la Prioral del Puerto la Catedral y la cartuja en Jerez de la Frontera en esta misma ciudad se encuentra La Parroquia de Santiago El Real y del Refugio, de la cual durante una intervención integral de restauración se han extraído probetas de este material objeto de este trabajo.

La iglesia en su origen era una ermita, y actualmente está formada por una estructura gótica de tres naves con algunos elementos adosados lateralmente. Las trazas de la actual iglesia de Santiago son atribuidas a Alonso Rodríguez, maestro mayor de la Catedral de Sevilla entre los años 1496 y 1513. La similitud entre los dos templos es importante, hasta el punto que se considera a la Iglesia de Santiago la herencia más directa de la Catedral de Sevilla.

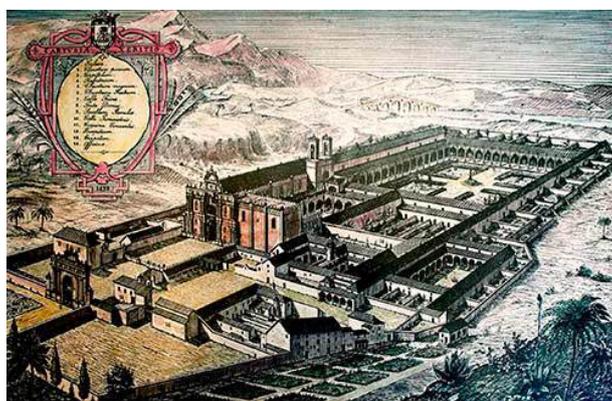


Figura 2: Grabado cartuja de Jerez de la Frontera

1.3 Desconocimiento de la piedra

Los estudios y ensayos que se han realizado hasta el momento de esta piedra de San Cristóbal, tan utilizada en nuestro Patrimonio, se han basado en sus propiedades físicas relacionadas con el acceso y movimiento del agua a través de sus poros⁵, cristalización de sales⁶ alteración acelerada en atmósfera contaminada⁷ para determinar su comportamiento frente a la humedad y frente a la contaminación y encontrar soluciones a adoptar para intentar prevenir su degradación.

Se han estudiado sus características petrofísicas de la piedra utilizada en la construcción de la Catedral de Sevilla, para aportar datos sobre su naturaleza y plantear y elegir los métodos y productos de conservación más adecuados⁸.

Basándose en el clima, en el urbanismo de Sevilla, en el ambiente y en los agentes biológicos, se hace una descripción de los indicadores visuales de alteración, y se estudian las modificaciones superficiales, deformaciones y eliminaciones de materia y rupturas⁹. Solo algunos estudios y de forma somera analizan las características mecánicas de la piedra.

Como ejemplo y situándonos en la estructura de la Iglesia de Santiago en la que se han planteado numerosos problemas, comenzando a finales del siglo XVII. Desde esta fecha y en varias ocasiones, han sido necesarias labores de rehabilitación o refuerzo, e incluso reconstrucción. Los principales problemas se manifiestan en grietas de elementos estructurales y desprendimiento de material, deformaciones y humedades, tanto en el exterior como en el interior del templo.

Se observa degradación de la piedra utilizada, la piedra de San Cristóbal¹⁰. Pues aprovechado dicha intervención realizada y teniendo la oportunidad de sacar un número importante de testigos en el sentido paralelo al eje de los pilares, se ha procedido a proponer un estudio por medios geofísicos los cuales nos permitan acercarnos a su comportamiento mecánico.

2. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es identificar las propiedades mecánicas de la piedra del Cerro de San Cristóbal mediante ensayo físicos y geofísicos (no destructivos), proponiendo un modelo que se basa en el estudio de los testigos extraídos de los elementos estructurales de la Iglesia de Santiago El Real y del Refugio, de Jerez de la Frontera¹.

3. METODOLOGÍA

Para la realización de este estudio y conseguir los objetivos inicia con la siguiente secuencia.

3.1 Documentación y elección de testigos.

Para la extracción de los testigos, se colocó la máquina de corona de corte encima de la cubierta de la Iglesia de Santiago, en los puntos más altos de los elementos estructurales. Se realizaron perforaciones controladas en toda la longitud de los pilares, muros, hasta la cota de cimentación.

Es importante identificar la localización de la probeta a estudio en la posición del pilar para ello se establece que desde la zona de cubierta donde estaría la cota +0.00 y va profundizando hacia la cimentación del elemento. En cada caja vienen unos 3.00m de testigo.

Se observa el estado de los testigos: conservación, disgregación, y se determinan uno a uno sus medidas: longitud, diámetro, para ver si son adecuados para los posteriores ensayos a realizar.

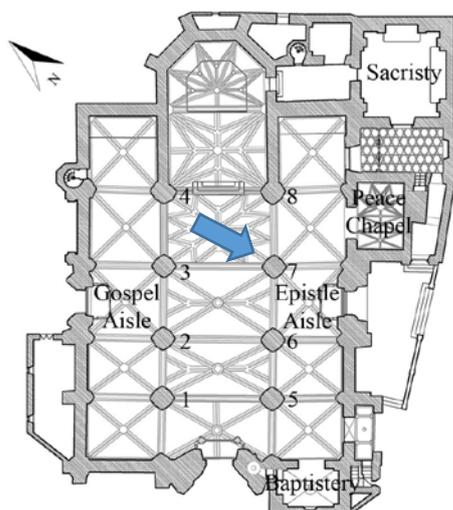


Figura 3: Plano de planta y ubicación Pilar 7 de la Iglesia de Santiago, Jerez de la Frontera.



Figura 4: Foto Pilar 7 de la Iglesia de Santiago, Jerez de la Frontera.

En el presente documento nos basamos en nueve probetas de las muchas que hay en el laboratorio, todas son de la posición de extracción SR, por ser las más originales, y todas pertenecen al PILAR 7. Las denominamos: P80, P88, P92, P100, P462, P482, P490, P491, P509, P534 y P587.

El pilar 7 es uno de los pilares menos restaurados a lo largo de la historia de la Iglesia de Santiago. En el 1928 se sustituyen los sillares dañados de la base por otros de la misma piedra pero seleccionada de la cantera, de mejor calidad¹¹.

3.2 Relación de ensayos

Ensayos físicos

Se propone el desarrollo de una campaña de identificación de ensayos tales como: absorción, porosidad abierta, y densidad aparente; para valorar el efecto de estos en las propiedades mecánicas de la piedra.

Relación de normas aplicadas:

- **(UNE-EN13755/2008)** Determinación de la Absorción de agua a presión atmosférica. Métodos de ensayo para piedra natural.
- **(UNE-EN1936/2007)** Determinación de la Densidad Real y Aparente y de la Porosidad Abierta y Total. Métodos de ensayo para piedra natural.

Ensayos geofísicos

- Se propone poner en valor una campaña de NDT, como técnica de identificación de las propiedades mecánicas mediante la identificación de la frecuencia natural. Dicha frecuencia natural se identificará transformando la señal registrada en el dominio del tiempo ante una vibración forzada según se establece en la norma **UNE-EN 14146/2004** Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad dinámico (con la medida de la frecuencia de resonancia fundamental).

Los ensayos geofísicos los realizamos, en seco y con humedad. Para las mediciones con humedad lo realizamos con un 40% de humedad (al considerar que es la proporción más parecida al estado real de la piedra), 80% y 100% de humedad.

Para realización de la campaña se procede a pesar y medir tanto en la longitud como en su diámetro de cada probeta, se introducen los datos en el equipo (Emodumeter de la empresa James Instruments), junto a su forma cilíndrica y el tipo de golpe que vamos a realizar: ensayo longitudinal, transversal o de torsión.

4. RESULTADOS

4.1 Resultados ensayos Físicos.

De la aplicación de las normas europeas (**UNE-EN13755/2008** y **UNE-EN1936/2007**) a las probetas seleccionadas y clasificadas para la realización de los ensayos físicos, resultan unos datos adjunto.

Tabla 1: Resumen de los datos de los ensayos físicos realizados

| Nomenclatura | nº Probeta | Geometría | | | Caracterización | | | | | | | |
|--------------|------------|---------------------|---------------------|----------------|-----------------|---------------|------------------|-----------------------------------|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| | | Cota situación m | Longitud Prob mm | Diámetro mm | Absorción % | V. Poro ml | V. aparent ml | Densidad sec Kg/m ³ | Poros Abier % | Densidad Sum Kg/m ³ | Densidad Sat Kg/m ³ | |
| P7_SR_1 | 80 | 22,40 | 211,50 | 82,93 | 13,14 | 0,07 | 0,21 | 1.771,10 | 33,64 | 1.108,78 | 2.106,78 | |
| P7_SR_2 | 88 | 19,40 | 167,50 | 82,87 | 13,10 | 0,04 | 0,12 | 1.824,33 | 31,65 | 1.142,21 | 2.140,21 | |
| P7_SR_3 | 92 | 17,20 | 194,00 | 82,88 | 21,87 | 0,03 | 0,08 | 1.686,10 | 36,95 | 1.056,85 | 2.054,85 | |
| P7_SR_5 | 100 | 12,45 | 204,00 | 83,13 | 23,40 | 0,08 | 0,20 | 1.645,83 | 38,66 | 1.036,98 | 2.034,98 | |
| P7_SR_6 | 462 | 11,15 | 202,00 | 83,10 | 16,50 | 0,10 | 0,33 | 1.856,43 | 30,75 | 1.169,06 | 2.167,06 | |
| P7_SR_10 | 482 | 1,00 | 114,03 | 70,63 | 16,53 | 0,04 | 0,10 | 1.711,02 | 35,77 | 1.070,03 | 2.068,03 | |
| P7_S1_1 | 490 | 22,13 | 233,24 | 80,91 | 12,27 | 0,06 | 0,19 | 1.822,33 | 31,82 | 1.141,94 | 2.139,94 | |
| P7_S1_1 | 491 | 21,82 | 182,83 | 82,29 | 13,90 | 0,07 | 0,20 | 1.735,80 | 35,08 | 1.087,89 | 2.085,89 | |
| P7_S1_6 | 509 | 11,60 | 144,32 | 70,67 | 12,71 | 0,03 | 0,08 | 1.746,94 | 34,71 | 1.095,32 | 2.093,32 | |
| P7_S1_9 | 534 | 2,79 | 143,70 | 71,37 | 12,50 | 0,03 | 0,10 | 1.759,59 | 34,08 | 2.099,74 | 2.099,74 | |
| P7_S2-9 | 587 | 1,97 | 158,69 | 71,43 | 12,52 | 0,04 | 0,13 | 1.784,72 | 33,03 | 1.116,35 | 2.114,35 | |

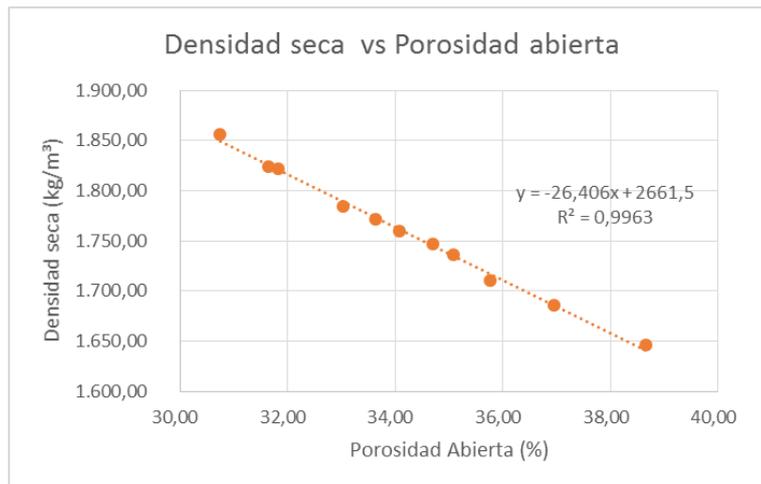


Figura 5: Grafica densidad Seca & Porosidad abierta

La densidad media de las probetas estudiadas es de 1758.56 Kg/m³ y la porosidad abierta media es bastante alta, 34.19%. La gráfica de regresión determina un coeficiente de determinación R²= 0.9963, indicado la poca dispersión existente en los datos obtenidos.

4.2 Resultados ensayos geofísicos

De toda la información que proporciona el equipo, solo vamos a utilizar la señal de la vibración en el tiempo. La transformación en el dominio de la frecuencia se realiza mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) para la determinación de la frecuencia fundamental

Este valor de frecuencia es el que nos sirve para calcular los módulos dinámicos correspondientes con las fórmulas que encontramos en la norma UNE. Este procedimiento se realiza para cada modo: longitudinal, transversal o de flexión y de torsión o cortante, y para estado de la probeta: en seco, al 40% de saturación, al 80% y al 100%.

- Calculo del módulo de elasticidad dinámico longitudinal a partir de la Frecuencia de resonancia fundamental en vibración y con su valor medio "FL", y aplicando la siguiente ecuación obtenemos el "E_{dL}" en MPa.

$$E_{dL} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot L^2 \cdot FL^2 \cdot p \cdot T \quad (1)$$

- Calculo del módulo de elasticidad dinámico transversal o de flexión a partir de la Frecuencia de resonancia fundamental en vibración y con su valor medio "FF", y aplicando la siguiente ecuación obtenemos el "E_{dF}" en MPa.

$$E_{dF} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot (\pi^2 \cdot L^4) / (4.734 \cdot i^2) \cdot FF^2 \cdot p \cdot C \quad (2)$$

- Calculo del módulo de elasticidad dinámico torsión o de cortantes a partir de la Frecuencia de resonancia fundamental en vibración y con su valor medio "FT", y aplicando la siguiente ecuación obtenemos el "E_{dT}" en MPa.

$$E_{dT} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot L^2 \cdot FT^2 \cdot p \cdot R \quad (3)$$

Tabla 2: Resumen de los datos de los ensayos geofísicos con humedad de estudio seco (0%) y Saturado (100%)

| nº Probeta | Humedad de estudio "Seco" | | | | | | |
|------------|---------------------------|----------------|------------|------------------|-----------------|-------------|--------------|
| | Longitudinal Hz | Transversal Hz | Torsión Hz | Longitudinal GPa | Transversal GPa | Torsión GPa | Poisson Seco |
| 80 | 4.479,17 | 2.265,63 | 2.697,27 | 7,087 | 6,803 | 2,570 | 0,379 |
| 88 | 7.630,21 | 4.544,27 | 4.736,33 | 11,780 | 9,802 | 4,539 | 0,298 |
| 92 | 4.521,48 | 2.578,13 | 2.746,09 | 5,189 | 5,307 | 1,914 | 0,356 |
| 100 | 3.723,96 | 2.148,44 | 2.304,03 | 3,807 | 4,382 | 1,454 | 0,309 |
| 462 | 5.244,14 | 2.890,63 | 3.239,40 | 8,137 | 8,388 | 3,105 | 0,310 |
| 482 | 5.566,41 | 3.261,72 | 3.518,88 | 3,330 | 1,711 | 1,331 | 0,251 |
| 490 | 4.042,97 | 1.966,15 | 2.763,56 | 6,386 | 7,206 | 2,995 | 0,066 |
| 491 | 5.234,38 | 2.949,22 | 3.115,23 | 6,273 | 5,644 | 2,222 | 0,412 |
| 509 | 8.510,28 | 7.336,28 | 3.102,44 | 8,510 | 7,336 | 3,102 | 0,372 |
| 534 | 5.234,38 | 3.242,26 | 3.014,32 | 3,989 | 3,562 | 1,323 | 0,508 |
| 587 | 7.291,67 | 4.244,79 | 4.501,95 | 9,672 | 9,289 | 3,687 | 0,312 |

| nº Probeta | Humedad de estudio "Saturado 100%" | | | | | | |
|------------|------------------------------------|----------------|------------|------------------|-----------------|-------------|-----------------|
| | Longitudinal Hz | Transversal Hz | Torsión Hz | Longitudinal GPa | Transversal GPa | Torsión GPa | Poisson Sat 100 |
| 80 | 3.750,00 | 1.945,31 | 2.473,96 | 4,97 | 5,02 | 2,16 | 0,15 |
| 88 | 6.875,00 | 4.016,93 | 4.255,64 | 9,57 | 7,66 | 3,67 | 0,30 |
| 92 | 3.645,83 | 2.062,50 | 2.249,35 | 3,37 | 3,39 | 1,28 | 0,32 |
| 100 | 3.222,65 | 1.765,62 | 1.894,53 | 2,85 | 2,96 | 0,99 | 0,44 |
| 462 | 4.641,93 | 2.519,53 | 2.991,54 | 6,38 | 6,37 | 2,65 | 0,20 |
| 482 | 4.954,43 | 2.910,16 | 3.056,64 | 2,64 | 1,36 | 1,00 | 0,31 |
| 490 | 2.968,75 | 1.406,25 | 1.822,92 | 3,44 | 3,69 | 1,30 | 0,33 |
| 491 | 4.049,48 | 2.343,75 | 2.490,23 | 3,75 | 3,57 | 1,42 | 0,32 |
| 509 | 6.966,15 | 4.166,67 | 4.348,96 | 6,88 | 5,89 | 2,68 | 0,28 |
| 534 | 4.153,65 | 2.473,96 | 2.584,64 | 2,51 | 2,07 | 0,97 | 0,29 |
| 587 | 6.497,40 | 3.671,88 | 4.062,50 | 7,68 | 6,95 | 3,00 | 0,28 |

4.3 Análisis de resultados

La primera propuesta de relación es comparar los datos de saturación: seco, 40%, 80%, y 100%, con las frecuencias de resonancia fundamentales, tanto longitudinales, de flexión como de torsión, comprueba que estas frecuencias son más altas en el estado en seco que cuando la piedra se humedece. Una vez saturada de agua la variación de frecuencias se mantiene estable con independencia del grado de saturación que tiene la probeta.

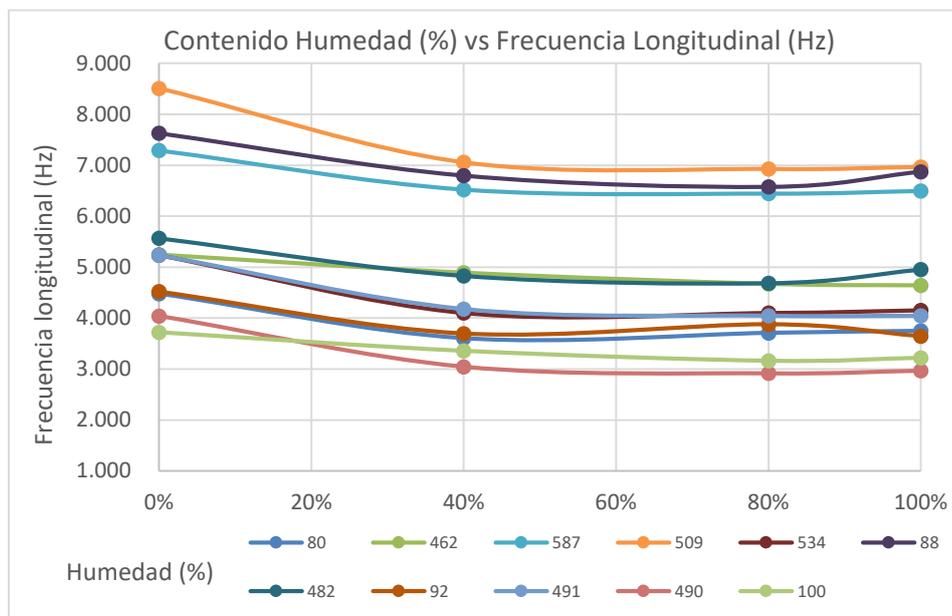


Figura 6: Grafica Humedad con Frecuencia Longitudinal

Otra relación de datos es el contenido de agua frente a los módulos de elasticidad dinámicos, observando un comportamiento similar a las anterior gráfica, en seco el modulo es mayor. Disminuyendo este con el aumento de la humedad y manteniéndose casi constante una vez que alcanza en 40% de humedad.

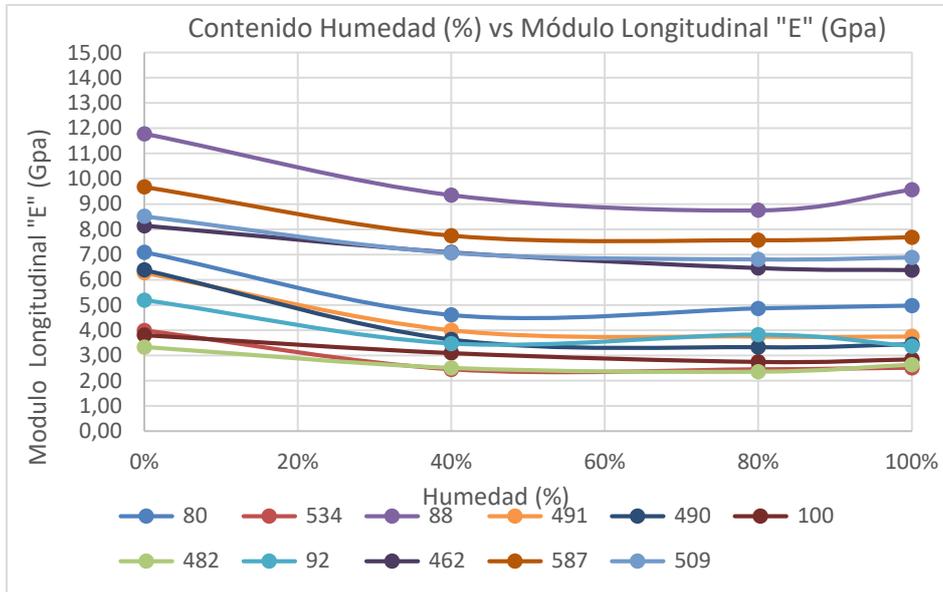


Figura 7: Grafica Humedad con Módulo Longitudinal

Si relacionamos el comportamiento de los datos obtenidos de las probetas de estudio: Porosidad Abierta y Módulo Longitudinal “E”, comprobamos que a mayor índice de poros el módulo de longitudinal es menor. La pendiente de la línea de tendencia entre los datos de grado de humedad seco y húmedo son similares. Además comprobamos que las líneas de tendencia, con los valores en distintas humedades de saturación (40,80 y 100%) son coincidentes.

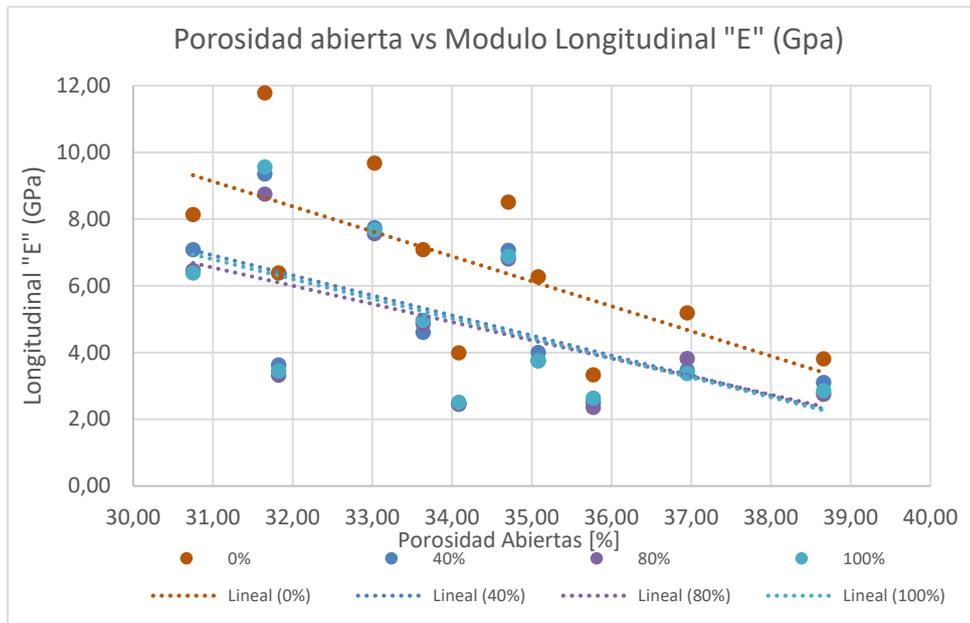


Figura 8: Grafica Relación Porosidad Abierta y Humedad con Frecuencia Longitudinal

Destacamos un dato que comprobamos que es característico de esta piedra que, al comparar las gráficas de las señales en el tiempo de los distintos estados de humedades, vemos que las señales en cualquier grado de saturación se amortiguan antes que las señales de las probetas en seco. Sin embargo este cambio de comportamiento de la señal no afecta a la calidad de los resultados.

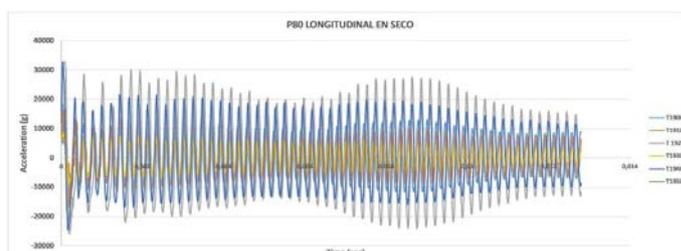


Figura 9: Señal de la vibración en el tiempo, estado seco 100%

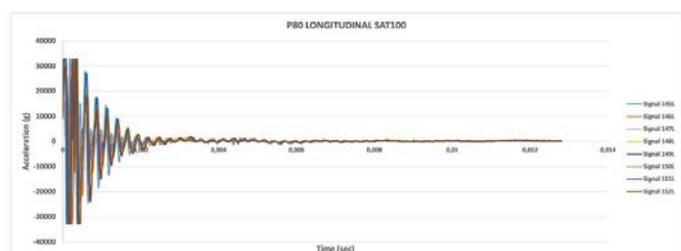


Figura 10: Señal de la vibración en el tiempo, estado saturado 100%

5 CONCLUSIONES

Se confirma que la piedra estudiada presenta una alta porosidad abierta y una baja densidad aparente, frente a otras piedras de la misma familia calcarenítica⁸. Los resultados obtenidos de los ensayos físicos realizados, se encuentran dentro del rango establecido por otros autores⁸ que han estudiado piedras similares.

Los resultados obtenidos de los ensayos geofísicos, confirman la alta capacidad de deformación que presenta esta piedra con valores bajos de su módulo de deformación dinámico.

Al analizar los resultados obtenidos en el estudio dinámico en los distintos grados de saturación, se observa que la arenisca del Cerro de San Cristóbal tiene el módulo de deformaciones longitudinal dinámico es mayor. Se observa que en el intervalo de seco a 40% de humedad la deformación aumenta considerablemente, permaneciendo prácticamente constante la deformación hasta llegar a una humedad del 100%.

La alta porosidad de esta piedra estudiada nos ha dificultado la identificación de los valores de frecuencia media de resonancia fundamentales en el ensayo de torsión, por lo que nos ha sido difícil obtener el módulo “G”. Para piedras con porcentajes de porosidad abiertos altos, sería conveniente emplear otros procedimientos de estudio, para los ensayos de torsión.

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] M^a Esperanza Rodríguez Mayorga, “Rehabilitación del Templo Parroquial de Santiago Apóstol en Jerez de la Frontera: Anamnesis, Diagnosis, Terapia y Control”.

[2] R.M. Eibert, J. Ordaz, F.J. Alonso, V.G. Ruiz de Argandoña, M. Montoro y L. Valdeón, “Características petrofísicas y alterabilidad de las piedras en la Catedral de Sevilla”, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo.

[3] Redacción de Gente del Puerto, Habitantes de El Puerto de Santa María, “2486 Las canteras de San Cristóbal”.

[4] Rosario Villegas Sánchez, “Evaluación de tratamientos de hidrofugación aplicados a piedras calizas de Catedrales Andaluzas”, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad de Sevilla.

[5] Rosario Villegas Sánchez, “Evaluación de tratamientos de hidrofugación aplicados a piedras calizas de Catedrales Andaluzas. Ensayo de alteración acelerada en atmósfera contaminada”, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad de Sevilla.

[6] M. Esbert, J. Ordaz, F.J. Alonso, V.G. Ruiz de Argandoña, M. Montoro y L. Valdeón, “Características petrofísicas y alterabilidad de las piedras en la Catedral de Sevilla”, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo.

[7] M. Alcalde y A. Martín, “Morfología macroscópica de alteración de la piedra de la Catedral de Sevilla”. Universidad de Sevilla.

[8] Puche Riart, O, García de Miguel JM, “El uso de las piedras de cortes en lo monumentos y en la construcción 1. Areniscas y Calizas”. Cátedra de Mineralogía. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Madrid.