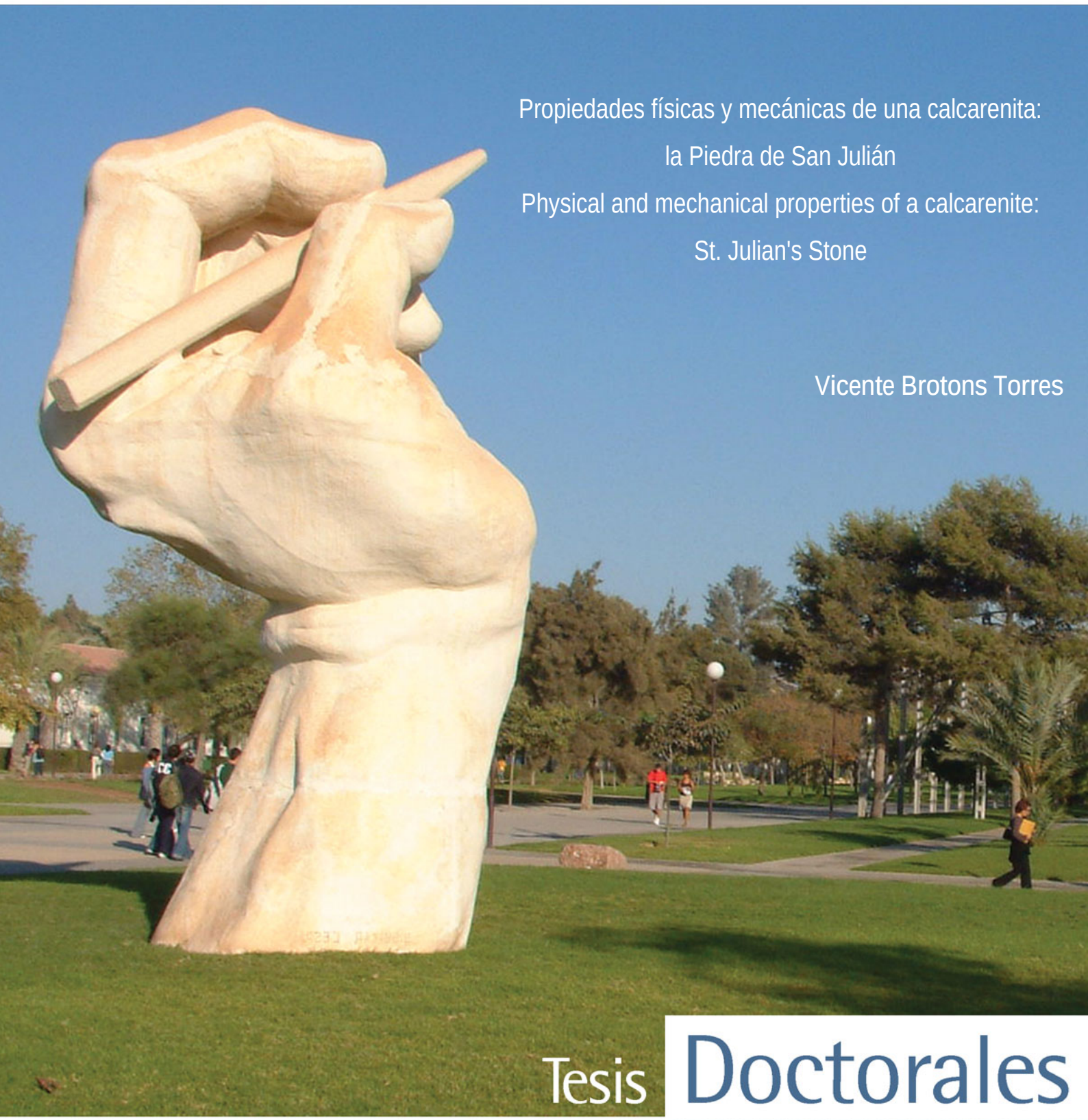
Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Propiedades físicas y mecánicas de una calcarenita: la Piedra de San Julián

Physical and mechanical properties of a calcarenite: St. Julian's Stone

Vicente Brotons Torres



Tesis Doctorales

www.eltallerdigital.com

UNIVERSIDAD de ALICANTE

UNIVERSIDAD DE ALICANTE

Departamento de Ingeniería Civil

Propiedades físicas y mecánicas de una calcarenita: la Piedra de San Julián

Physical and mechanical properties of a calcarenite: St. Julian's Stone

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

TESIS DOCTORAL

Autor:

Vicente Brotons Torres

Directores:

Dr. Roberto Tomás Jover

Dr. Salvador Ivorra Chorro

Alicante, Abril de 2014

Universidad de Alicante

Departamento de Ingeniería Civil

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Tesis doctoral presentada por D. Vicente Brotons Torres, en forma de compendio de publicaciones, de acuerdo con lo establecido por el pleno de la Comisión de Doctorado de 2 de marzo de 2005 de la Universidad de Alicante, para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Alicante bajo la dirección de los Doctores Roberto Tomás Jover y Salvador Ivorra Chorro

Vto. Bº. Directores de la Tesis doctoral

Dr. Roberto Tomás Jover

Dr. Salvador Ivorra Chorro

El doctorando

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Fdo. D. Vicente Brotons Torres

Alicante, Abril de 2014

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....IX

ÍNDICE DE TABLAS.....XI

ÍNDICE DE ECUACIONES.....XIII

AGRADECIMIENTOS.....XV

RESUMEN.....XXI

Palabras clave.....XXII

I. PARTE PRIMERA. SÍNTESIS GENERAL DE LA TESIS

1. Introducción.....**5**

1.1. La Piedra de San Julián.....5

1.2. Antecedentes y estado del arte.....7

1.2.1. Fluencia.....7

1.2.2. Exposición a altas temperaturas.....16

1.2.3. Relación entre módulos estáticos y dinámicos.....19

1.3. Objetivos de la investigación.....24

1.3.1. Fluencia.....24

1.3.2. Exposición a altas temperaturas.....25

1.3.3. Relación entre módulos estáticos y dinámicos.....26

1.4. Rationale.....27

1.5. Trabajos presentados y justificación de la unidad temática.....28

2. Metodología, hipótesis y plan de trabajo.....**35**

2.1. Metodología.....35

2.1.1. Recogida y preparación de muestras.....35

2.1.2. Ensayos comunes.....36

2.1.2.1. Mineralogía.....36

2.1.2.2. Porosidad y densidad.....36

2.1.2.3. Ultrasonidos.....37

2.1.2.4. Deformabilidad y resistencia a compresión uniaxial.....38

2.1.2.5. Durabilidad SDT.....38

2.1.3. Ensayos específicos.....39

2.1.3.1. Fluencia.....39

2.1.3.2. Exposición a altas temperaturas.....40

2.1.3.3. Relación entre módulos estáticos y dinámicos.....41

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2.2. Hipótesis 42
2.2.1. Fluencia 42
2.2.2. Exposición a altas temperaturas 43
2.2.3. Relación entre módulos estáticos y dinámicos 43
2.3. Plan de trabajo 44
3. Resultados 49
3.1. Ensayos previos 49
3.1.1. Mineralogía 49
3.1.2. Porosidad 50
3.1.3. Ultrasonidos 53
3.1.4. Ensayos mecánicos 55
3.2. Ensayos específicos 57
3.2.1. Fluencia 57
3.2.2. Sometimiento a altas temperaturas 58
3.2.2.1. Porosidad 58
3.2.2.2. Ultrasonidos 59
3.2.2.3. Constantes elásticas 60
3.2.2.4. Resistencia a compresión uniaxial (UCS) 64
3.2.2.5. Durabilidad (SDT) 65
3.2.3. Relación entre módulos estáticos y dinámicos 67
4. Análisis global y discusión de los resultados 71
4.1. Fluencia 71
4.2. Sometimiento a altas temperaturas 76
4.3. Relación entre módulos estáticos y dinámicos 78
5. Conclusiones 85
6. Futuras líneas de investigación 91
6.1. Trabajos en curso 91
6.2. Nuevas líneas de investigación 93
7. Referencias bibliográficas 97

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

II. PARTE SEGUNDA. COMPENDIO DE ARTÍCULOS

1. Artículos aceptados para su publicación

Artículo 1º. Brotons, V., Ivorra, S., Martínez-Martínez, J., Tomás, R., Benavente, D.: *"Study of creep behavior of a calcarenite: San Julián´s stone (Alicante)"*, Materiales De Construccion, Vol. 63, n. 312 (2013), pp. 581-595. doi: 10.3989/mc.2013.06412.

Artículo 2º. Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Alarcon, J.C.: *"Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian´s calcarenite"*, Engineering Geology, Vol. 167, n. (2013), pp. 117-127. doi: 10.1016/j.enggeo.2013.10.012.

Artículo 3º. Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A.: *"Relationship between static and dynamic elastic modulus of a calcarenite heated at different temperatures: the San Julián's stone"*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. BOEG-D-13-00162R3, n. (2014), pp. doi: 10.1007/s10064-014-0583-y. (aceptado).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Construcciones con la Piedra de San Julián en la ciudad de Alicante: Basílica de Santa María, Catedral de San Nicolás, Ayuntamiento, Teatro Principal y Palacio de Gravina. Abajo: detalle de arcos y bóvedas en la Catedral de San Nicolás. ..... - 6 -

Figura 2- Modelo de Burger-MC. (Guan, et al., 2009).(G^K, η^K: rigidez y viscosidad de los elementos de la celda de Kelvin; G^M, η^M: rigidez y viscosidad de los elementos de la celda de Maxwell; R: tensión de umbral del deslizador). ..... - 8 -

Figura 3- Fases típicas de fluencia. ε_0: deformación elástica instantánea. ..... - 10 -

Figura 4- Modelo con componentes elástica, visco-elástica y visco-plástica. G^{el}: rigidez del elemento elástico; G^{ve}, η^{ve}: rigidez y viscosidad del elemento visco-elástico; η^{vp}: viscosidad del elemento visco-plástico; c_{lim}, ϕ_{lim}: cohesión y ángulo de rozamiento que determinan la tensión de inicio de la fase viscoplástica. ..... - 11 -

Figura 5- Resistencia a compresión uniaxial normalizada (Brotons, et al., 2013). ..... - 18 -

Figura 6- Módulo de elasticidad normalizado (Brotons, et al., 2013). ..... - 18 -

Figura 7- Representación de las relaciones entre módulos estáticos y dinámicos propuestas por varios autores e incluidas en la Tabla 3 (Brotons, et al., 2014). ..... - 23 -

Figura 8 – Boca sur del túnel del TRAM y taludes sobre vías de comunicación en Serra Grossa. ..... - 35 -

Figura 9 - Rampa de carga ..... - 40 -

Figura 10- Calcita-verde; cuarzo-rojo, naranja-ankerita; azul-dolomita; morado-illita. ..... - 49 -

Figura 11- Deformación unitaria en el tiempo de la Piedra de San Julián. ..... - 57 -

Figura 12- Incremento de la porosidad. ..... - 58 -

Figura 13- Atenuación espacial de la onda ultrasónica. ..... - 59 -

Figura 14- Módulo elástico antes/después (Ensayo ultrasónico). ..... - 60 -

Figura 15- Descenso del módulo elástico (Ensayo ultrasónico). ..... - 61 -

Figura 16- Módulo elástico después (Ensayo mecánico). ..... - 62 -

Figura 17- Coeficiente de Poisson antes/después (Ensayo ultrasónico). ..... - 62 -

Figura 18- Descensos del Coeficiente de Poisson (Ensayo ultrasónico). ..... - 63 -

Figura 19- Coeficiente de Poisson antes/después (Ensayo mecánico). ..... - 63 -

Figura 20- Resistencia a compresión uniaxial antes/después (Ensayo mecánico). ..... - 64 -

Figura 21- Descenso de la resistencia a compresión uniaxial (Ensayo mecánico). ..... - 65 -

Figura 22- Durabilidad antes/después (Ensayo mecánico). ..... - 66 -

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Figura 23- Velocidad de las ondas P y S, y correlación para las muestras enfriadas en seco. Los círculos corresponden a los valores de las muestras enfriadas con agua. ..... *- 67 -*

Figura 24- Curva de fluencia del hormigón H01 (azul) y la roca ensayada (gris). ..... *- 72 -*

Figura 25- Modelo reológico propuesto. E_i: rigideces de los resortes; η_i: viscosidades de los amortiguadores. ..... *- 74 -*

Figura 26- Modelo (FIB, 2010) (Ecuación 14) ajustado a los datos experimentales (azul) y fluencia estimada con la Ecuación 16 (rojo) ..... *- 75 -*

Figura 27- Relaciones entre módulos estáticos y dinámicos de la Piedra de San Julián, y correlaciones propuestas por varios autores. ..... *- 78 -*

Figura 28- Resultados de los ensayos y correlaciones propuestas. ..... *- 80 -*

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Factores utilizados por varios código. Traducido de Fanourakis y Ballim (2003)..... - 14 -

Tabla 2 - Coeficientes de variación de los errores de predicción (ω_j) para seis tipos de hormigón (Mix) confeccionados con diferentes áridos y distintas resistencias a compresión uniaxial: Q1 (árido de cuarcita-UCS 37 MPa), Q2 (árido de cuarcita-UCS 65 MPa), G1 (árido de granito-UCS 38 MPa), G2 (árido de granito-UCS 65 MPa), A1 (árido de andesita-UCS 48 MPa), A2 (árido de andesita-UCS 74 MPa). ω_{all}: coeficiente de variación del conjunto de los seis juegos de datos..... - 15 -

Tabla 3 - Relaciones entre módulos estáticos (E_{st}) y dinámicos (E_{dyn}) propuestas por varios autores. En la ecuación de Eissa y Kazi's (1988) ρ_{bulk} está expresada en g/cm^3. R^2: coeficiente de determinación..... - 21 -

Tabla 4 - Porosidad y densidad de las muestras intactas. Φ: diámetro, M_d: masa seca, M_h: masa sumergida, M_s: masa saturada, ρ_{bulk}: densidad aparente, n_0: porosidad abierta, n: porosidad total..... - 50 -

Tabla 5 - Porosidad y densidad de las muestras intactas. Φ: diámetro, Md: masa seca, Mh: masa sumergida, Ms: masa saturada, ρbulk: densidad aparente, n0: porosidad abierta, n: porosidad total..... - 51 -

Tabla 6 - Ultrasonidos y módulos dinámicos. Φ: diámetro, Vp: velocidad de las ondas P, Vs: velocidad de las ondas S, Att: atenuación espacial, Edyn: módulo de elasticidad dinámico, vdyn: coeficiente de Poisson dinámico..... - 53 -

Tabla 7 - Ultrasonidos y módulos dinámicos. Φ: diámetro, V_p: velocidad de las ondas P, V_s: velocidad de las ondas S, Att: atenuación espacial, E_{dyn}: módulo de elasticidad dinámico, ν_{dyn}: coeficiente de Poisson dinámico. ..... - 54 -

Tabla 8 - Ensayos mecánicos previos. E_{dyn} , E_{st}: módulos de elasticidad dinámico y estático; ν_{dyn} , ν_{st}: coeficientes de Poisson dinámico y estático; UCS: resistencia a compresión uniaxial..... - 55 -

Tabla 9 - Ensayos mecánicos previos. E_{dyn} , E_{st}: módulos de elasticidad dinámico y estático; ν_{dyn} , ν_{st}: coeficientes de Poisson dinámico y estático; UCS: resistencia a compresión uniaxial..... - 56 -

Tabla 10 - Índices de Sehudes obtenidos mediante el ensayo SDT (Slake Durability Test). I_{di}: índice de Sehudes después de i ciclos..... - 65 -

Tabla 11 - Características del hormigón de referencia H01..... - 72 -

Tabla 12 - Parámetros del modelo reológico (Ecuación 15)..... - 74 -

Tabla 13 - Matriz de coeficientes de determinación..... - 79 -

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 ..... *- 21 -*

Ecuación 2 ..... *- 21 -*

Ecuación 3 ..... *- 22 -*

Ecuación 4 ..... *- 22 -*

Ecuación 5 ..... *- 22 -*

Ecuación 6 ..... *- 22 -*

Ecuación 7 ..... *- 22 -*

Ecuación 8 ..... *- 36 -*

Ecuación 9 ..... *- 37 -*

Ecuación 10 ..... *- 38 -*

Ecuación 11 ..... *- 68 -*

Ecuación 12 ..... *- 68 -*

Ecuación 13 ..... *- 71 -*

Ecuación 14 ..... *- 71 -*

Ecuación 15 ..... *- 74 -*

Ecuación 16 ..... *- 75 -*

Ecuación 17 ..... *- 79 -*

Ecuación 18 ..... *- 80 -*

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quedo muy agradecido a mis directores de tesis, los profesores Dr. Salvador Ivorra Chorro y Dr. Roberto Tomás Jover por su constante apoyo e imprescindible colaboración, sin cuyo concurso esta tesis no hubiera sido posible. No es de menor importancia la comprensión que han mostrado respecto a las circunstancias en las que personalmente he desarrollado este trabajo: mi labor como investigador empieza en 2011, habiéndome incorporado a la comunidad universitaria un año antes, después de haberla abandonado nada más terminar los estudios de Ingeniería. Los comienzos siempre son difíciles y los consejos de los expertos son de inestimable ayuda.

Los profesores de la Universidad de Alicante Dr. David Benavente y Dr. Javier Martínez-Martínez, y del Laboratorio de Petrología (Unidad Asociada al CSIC), han colaborado en el artículo sobre fluencia en la descripción mineralógica de la roca, los ensayos de difracción por RX y facilitando la utilización de los equipos para los ensayos de ultrasonidos.

El profesor de la Universidad de Alicante Dr. José Marcos Ortega ha realizado los ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio incluidos en el artículo sobre la relación entre módulos estáticos y dinámicos.

Victoriano Rodrigo, técnico del laboratorio de Mecánica del Suelo y de las Rocas del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Alicante y José Carlos Alarcón, alumno de Ingeniería de Obras Públicas, han colaborado en la realización de algunos de los ensayos de este trabajo y en el tallado de las muestras.

Agradecimientos a la empresa U.T.E. FCC Construcción, S.A. y Enrique Ortiz e Hijos Contratistas de Obras, S.A por el suministro de las muestras de roca de la excavación del túnel del TRAM.

Por último, quiero agradecer a los revisores anónimos de los artículos que conforman este compendio por sus oportunos comentarios que han permitido mejorar la calidad de este trabajo.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Universidad de Alicante en el marco de los proyectos uausti11–11 y gre09–40, por la Generalitat Valenciana a través del proyecto gv/2011/044 y por el Ministerio de Economía y Competitividad mediante el proyecto BIA 2012-34316.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

A mis hijos Héctor, César e Irene

A mis padres

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Τα πάντα ρει, τίποτα δεν μένει ακίνητο

Ηράκλειτος της Εφέσου (το σκοτάδι)

Todo fluye, nada permanece.

Heráclito de Éfeso

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

RESUMEN

En este trabajo se estudian las características físico-mecánicas de la Piedra de San Julián y su comportamiento frente a procesos de calentamiento a temperaturas similares a las alcanzadas en un incendio, así como la puesta a punto y validación de métodos dinámicos no destructivos para el dictamen del estado de desgaste del material. El enfoque está orientado a los parámetros que más interesan en la utilización de la Piedra como material de construcción. Dado que esta Tesis se realiza por compendio de artículos, por razones prácticas y necesidades de publicación, el contenido de la misma está dividido en tres grandes bloques, como son: fluencia, exposición a altas temperaturas y relación entre módulos estáticos y dinámicos.

Para el estudio de la fluencia o deformabilidad a largo plazo bajo carga constante se han realizado ensayos de carga estáticos de larga duración. Por otra parte, se ha efectuado un análisis del comportamiento reológico del hormigón en las distintas normativas, especialmente en el Código Modelo FIB (2010), y se ha buscado un paralelismo entre las previsiones del Código y los resultados obtenidos en los ensayos. Al mismo tiempo se han probado varios modelos reológicos que reproduzcan de forma precisa el comportamiento de la fluencia según el Código y los ensayos. Esto ha permitido ajustar una función, adaptando las especificaciones del Código modelo, que describe la deformación en el tiempo de la Piedra de San Julián. La validez teórica de esta ecuación alcanza períodos temporales similares a los existentes para los ensayos realizados con hormigón. El modelo reológico que se ha obtenido por ajuste de todo el período anterior, consta de cuatro celdas de Kelvin y predice igualmente la deformación por fluencia de la roca. La correcta evaluación de las deformaciones a largo plazo es necesaria siempre que se estudie la intervención en edificaciones históricas, bien sea variando la distribución de cargas, o simplemente realizando obras de mantenimiento de cierto calado.

La influencia de la temperatura alcanzada y del proceso de enfriamiento utilizado, se ha analizado sobre 55 muestras de roca calentando a temperaturas de hasta 600 ^{0}C y enfriando por dos métodos: al aire y mediante inmersión en agua, ambas a temperatura ambiente. Los parámetros controlados antes y después del proceso térmico han sido: porosidades abierta y total, velocidad de propagación de ondas ultrasónicas, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, resistencia a compresión uniaxial (UCS) y durabilidad según el ensayo de sequedad, humedad y desmoronamiento, *Slake Durability Test* (SDT). Como conclusiones más notables cabe destacar: la UCS disminuye en un 35% y en un 50% según el enfriamiento se haya realizado al aire o por inmersión, mientras que el módulo de

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

elasticidad se reduce entre un 75% y un 80%. Las conclusiones obtenidas son importantes para la determinación del daño estructural producido en un incendio, así como para evaluar la influencia del método de extinción. Por otra parte, pueden servir para estimar indirectamente la temperatura máxima alcanzada en un incendio, de cara a la determinación de los posibles efectos sobre otros elementos constructivos.

Para la relación entre módulos estáticos y dinámicos se han estudiado 24 muestras con diferentes grados de deterioro. Con los datos obtenidos en los ensayos se han analizado estadísticamente quince modelos de relación con diferentes combinaciones de variables, y se ha construido la correspondiente matriz de correlación. El coeficiente de determinación más alto corresponde a una relación lineal entre ambos módulos. La determinación del módulo de elasticidad por medios no destructivos y de fácil implementación es muy útil cuando se trata de dictaminar sobre el envejecimiento de un material estructural de este tipo. El valor del módulo con respecto al de la roca intacta es un indicador de las características resistentes y grado de debilitamiento del material. Sin embargo, el módulo bajo cargas gravitatorias -estáticas- difiere en general del obtenido dinámicamente, de una manera diferente según el material que se analice. Aquí se ha obtenido una expresión, que correlaciona con un alto valor del coeficiente de determinación ambos módulos, para la roca estudiada.

Los parámetros, relaciones y modelos estudiados y propuestos en esta tesis, suponen un importante avance científico de gran utilidad para la conservación y restauración del patrimonio de edificios y otras obras de carácter histórico-cultural construidas con la Piedra de San Julián. Asimismo, las conclusiones obtenidas y los medios y métodos empleados podrán ser extrapolados a otros materiales similares con las adaptaciones oportunas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Palabras clave

Fluencia, modelo reológico, roca blanda, calcarenita, patrimonio histórico, altas temperaturas, resistencia a compresión, módulo elástico, módulo dinámico.

ABSTRACT

In this thesis, the physical and mechanical properties of the so called “Piedra de San Julian” (St. Julian's Stone) and its behavior under heating with similar temperatures to those reached in a fire, have been studied, as well as the development and validation of dynamic, non-destructive methods for the prediction of the material wear. The approach is focused on the main relevant parameters in the use of this kind of stone as a building material. Since this thesis has been made by compendium of papers, for practical reasons and publishing needs, the content thereof is divided into three sections including: creep behavior, exposure to high temperatures and relationship between static and dynamic modules.

For the creep study or long-term deformability under constant load, static tests of long duration were developed. Moreover, an analysis of the rheological behavior of concrete in different regulations, ~~e~~especially in the FIB Model Code (2010) has been made, and a parallelism between the provisions of the Code and the results obtained in the tests, has been found. At the same time, several rheological models which accurately reproduce the creep behavior according to the Code and the laboratory tests have been tested. This has allowed the fitting of a function, through the adaptation of the model-code specifications, describing the long term deformation of the St. Julian's Stone. The theoretical validity of this equation reaches similar time periods than those corresponding to the studies performed with concrete. The rheological model, which has been fitted to the whole previous period, consists of four Kelvin cells and also predicts the creep deformation of the rock. The correct evaluation of long-term deformation is necessary whenever ~~is studied~~ the intervention in historic buildings is studied, either by varying changing the load distribution, or simply by performing maintenance works of a significant scale. The influence of the reached temperature and the applied cooling process was analyzed on 55 rock samples, which were heated at temperatures up to 600 ^{0}C, and by two cooling methods: in the air and by water immersion, both at ambient temperature. The monitored parameters, before and after the thermal process were: open and total porosity, velocity of ultrasonic wave propagation, elastic modulus, Poisson's ratio, uniaxial compressive strength (UCS) and durability test according to the dry, moisture and crumble test (Slake Durability Test , SDT). The most remarkable conclusions are: the UCS decreases up to 35% or 50% depending on if the cooling method, by air or by water immersion, while the elastic modulus is reduced by 75% or 80%, respectively. The obtained conclusions are important for determining the structural damage caused by fire, and to evaluate the

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

influence of the extinction method. Moreover, they can be useful to indirectly determine the maximum temperature reached in a fire, in order to determine the possible effects on other building elements.

For the relationship between static and dynamic modulus 24 samples with different degrees of deterioration were studied. With the data obtained in the tests, fifteen relationship models were statistically analyzed with different combinations of variables, and the corresponding correlation matrix was built. The highest coefficient of determination corresponds to a linear relationship between the two modules. The assessment of the elastic modulus by non-destructive means of easy implementation is very useful when it comes to decide the aging of a structural material of this type. The value of the module with respect to the intact rock is indicative of the strength characteristics and the degree of weakening of the material. However, the modulus under static gravity load differs of the one dynamically obtained, in ~~a~~ different ways depending on the material being analyzed. In this work, an expression has been obtained correlating both modules in the studied rock with a high coefficient of determination.

The relationships and models studied and proposed in this thesis, represent an important scientific advance very useful for conservation and restoration of heritage buildings and other monuments of historical and cultural character built with the St. Julian's Stone. Similarly, the obtained conclusions and the used means and methods could be extrapolated to other similar materials with the adequate modifications.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Keywords

Creep, rheological model, soft rock, calcarenite, historical heritage, high temperature, compressive strength, elastic modulus, dynamic modulus.

PARTE PRIMERA

Síntesis General de la Tesis

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1. Introducción

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1. Introducción

1.1. La Piedra de San Julián

El objeto de estudio de esta tesis es una piedra caliza porosa ampliamente utilizada como material de construcción en la ciudad de Alicante. Esta roca se conoce localmente como Piedra de San Julián. Se trata de una caliza neógena del prebético. Forma los principales afloramientos de las colinas que rodean el perímetro urbano de la ciudad. Estos afloramientos han actuado como canteras durante siglos, situadas principalmente en el cerro de San Julián (Serra Grossa) y sierra del Molinete, y han proporcionado los sillares de los principales edificios históricos de la ciudad. Este material se ha utilizado desde la época romana para la construcción de edificios o murallas, como se puede comprobar en la ciudad ibero-romana de Lucentum (siglos V-VI a.c.). En época histórica podemos señalar construcciones de uso público o privado, de diversos tipos:

- Castillo de Santa Bárbara: en su origen fortaleza musulmana (s. IX).
- Basílica de Santa María: la iglesia más antigua de la ciudad, se construyó en estilo gótico entre los siglos XIV y XVI sobre los restos de la antigua mezquita mayor de la ciudad.
- Catedral de San Nicolás: edificada sobre los restos de una mezquita, su construcción se realizó entre 1616 y 1662, aunque su claustro, más antiguo, data del siglo XV.
- Ayuntamiento: construido en 1668.
- Palacio de Gravina: construido en el s. XVIII, hoy convertido en Museo.
- Castillo de San Fernando: data de la época de la Guerra de 1808.
- Teatro principal: construido en 1846.
- Mercado central: construido en 1921.

Algunas de estas construcciones se incluyen en la *Figura 1*: a la izquierda la Basílica de Santa María (arriba) y la Catedral de San Nicolás, y a la derecha el edificio del Ayuntamiento (arriba), el Teatro Principal y el Palacio de Gravina. Abajo se observa un detalle de arco y bóveda. La pérdida de rigidez en el material del que están construidos los arcos tiene gran influencia sobre la deformación y capacidad portante de los mismos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Figura 1 – Construcciones con la Piedra de San Julián en la ciudad de Alicante: Basílica de Santa María, Catedral de San Nicolás, Ayuntamiento, Teatro Principal y Palacio de Gravina. Abajo: detalle de arcos y bóvedas en la Catedral de San Nicolás.

Por otra parte, importantes vías de comunicación y núcleos habitados están expuestos a desprendimientos de taludes de este material, y las líneas de tranvía futuras de la red de transporte público se construyen a través de estas colinas y, por consiguiente, la piedra caliza porosa estudiada constituirá el soporte geotécnico de los túneles del tranvía. De hecho, las muestras estudiadas en este trabajo se obtuvieron a partir de bloques de piedra extraídos de la excavación de la línea de tranvía en la Serra Grossa, situada en el noreste del casco urbano de Alicante. Todas estas razones justifican la importancia de obtener un conocimiento en profundidad de esta roca específica.

1.2. Antecedentes y estado del arte

En los siguientes apartados se realizará una exposición de los estudios existentes, realizando el análisis, como se ha dicho en la introducción, en tres grandes bloques que se corresponden con los artículos que componen la tesis: Fluencia, Efectos de la temperatura y Relación entre módulos estáticos y dinámicos.

1.2.1. Fluencia

Las rocas de alta porosidad sufren importantes deformaciones volumétricas al ser sometidas a cargas. Estas deformaciones se producen tanto a corto como a largo plazo y con unas características distintas de otros tipos de rocas. Es por ello necesario establecer un modelo reológico diferenciado que responda al comportamiento de estas rocas, y realizar los correspondientes ensayos que permitan ajustar el modelo a los datos experimentales. No existen muchos estudios sobre la fluencia a largo plazo en rocas en la literatura científica, al contrario que para el caso del hormigón, donde existen modelos bien establecidos (Barpi y Valente, 2004; Baweja*, et al.*, 1998; Bazant y Baweja, 1995; Bazant*, et al.*, 1995; FIB, 2010; Lorefice*, et al.*, 2006; Mazloom, 2008). Esto quizá se deba, entre otras cosas, a la dificultad de unificar los distintos tipos de roca en un modelo único por la propia variabilidad de las características físicas de las mismas, incluso dentro de un mismo grupo, como puede ser el de las rocas porosas o blandas.

Algunos de los estudios sobre rocas están enfocados en el desarrollo de las técnicas para la construcción y mantenimiento de túneles como en Weng, *et al* (2010), que proponen un modelo constitutivo para rocas débiles, enfocado a predecir el comportamiento a largo plazo de cara a la seguridad en túneles. El ajuste está

realizado para una arenisca de Taiwán. Para otros materiales se necesitan más ensayos y ajuste de parámetros.

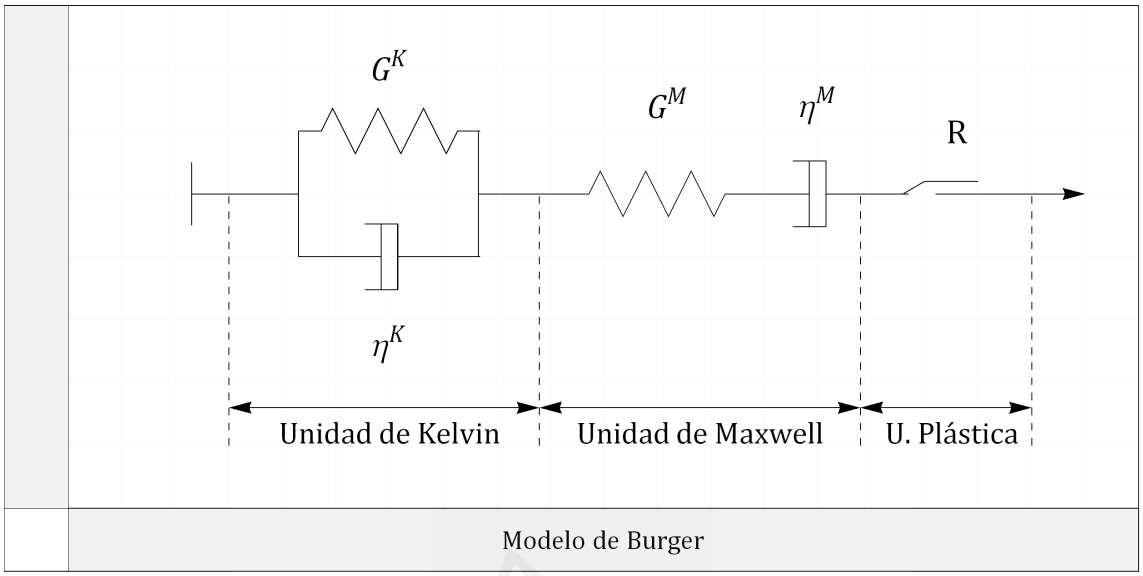


Figura 2- Modelo de Burger-MC. (Guan, et al., 2009).(G^K, η^K: rigidez y viscosidad de los elementos de la celda de Kelvin; G^M, η^M: rigidez y viscosidad de los elementos de la celda de Maxwell; R: tensión de umbral del deslizador).

En el mismo sentido y con la misma finalidad, Guan, *et al* (2009), parten del modelo reológico de Burger (*Figura 2*), para establecer las deformaciones por fluencia en túneles. La novedad es que el ajuste de los parámetros involucrados se realiza mediante Redes Neurales y Algoritmos Genéticos, partiendo de una aproximación inicial por elementos finitos. De una manera más genérica, no específica para túneles, Sterpi y Gioda (2009) proponen un modelo reológico para el estudio de macizos rocosos, basado en el estudio de rocas intactas en laboratorio, y señalan la dificultad de establecer parámetros concretos que reflejen el comportamiento de cada clase de roca y estado del macizo, debido a la variabilidad local de la roca y a la caracterización, necesariamente difusa, de los macizos rocosos. En un análisis concreto de un caso particular, Nadimi, *et al.* (2011) aplican un modelo constitutivo a una excavación realizada en roca (vaciado de grandes dimensiones del interior de un macizo), y lo comparan con los desplazamientos realmente medidos. Los parámetros del modelo se determinan mediante ensayos de compresión triaxial de muestras de roca en laboratorio.

De una manera más general en cuanto al tipo de material objeto de estudio, abarcando los llamados geomateriales que incluyen tanto a las rocas como al hormigón, Shao, *et al.* (2003) proponen un modelo constitutivo para la fluencia en el que ésta se considera como la consecuencia macroscópica de los cambios producidos en la microestructura. Estos cambios pueden deberse a procesos de degradación de diferente naturaleza (e.g. mecánicos, porosidad, químicos). En este caso se intenta una explicación de las causas de la fluencia, además de proponer un modelo que describa su evolución temporal. En la misma línea, pero ligando la deformación diferida únicamente a la aparición de microfisuras, Zuan (2003) analiza la deformación volumétrica mediante un modelo constitutivo que describe el inicio y las velocidades de propagación y unión de las microfisuras en la roca.

La mayoría de los estudios citados recurren a la realización de ensayos de muestras de roca en condiciones de laboratorio, no existiendo un método unificado que describa los ensayos a realizar y la extrapolación de los resultados a macizos rocosos. Situando este problema en primer plano, Jandakaew (2007) estudia la influencia del tipo de ensayo (*stress-path*) en los parámetros obtenidos para la calibración de los modelos de fluencia en roca. En una línea similar, Berest, *et al.,* (2005) estudian empíricamente la fluencia muy lenta, para niveles de carga muy bajos. Asimismo, Fuenkajorn y Phueakphum (2010) estudian el efecto de los ciclos de carga-descarga. En Fu, *et al.* (2008) se estudian empíricamente las variaciones en las características micro-mecánicas de las rocas bajo cargas gravitatorias.

También se han estudiado las rocas duras cristalinas de rotura frágil, caracterizando su respuesta de una manera totalmente diferente a la de las rocas débiles (Damjanac y Fairhurst, 2010), partiendo del modelo reológico de Burger para la fluencia. También con materiales frágiles, con cargas sostenidas e incrementadas hasta altos niveles de tensión que hacen entrar en juego las fluencias secundaria y terciaria, Papa y Taliercio (2005) proponen un modelo de Burger modificado y lo validan con ensayos en elementos de mampostería y hormigón.

Otro tipo de enfoque es el estudio del comportamiento de la roca no en su estado natural en el macizo rocoso, sino como material de construcción, analizando la deformación temporal de los elementos en los que interviene; en esta línea Anzani, *et al.* (2009), estudian la deformación a largo plazo en mampostería de edificios históricos con un tratamiento experimental-probabilístico.

En todos los trabajos publicados se distingue entre el comportamiento cualitativo en fluencia de rocas porosas y rocas duras. En rocas duras –frágiles-, se ha observado

que prácticamente no existe la fluencia secundaria (Damjanac y Fairhurst, 2010), pasando del estado de velocidades de deformación decrecientes (fluencia primaria), al estado de velocidades crecientes hasta el inevitable colapso (fluencia terciaria) (*Figura 3*).

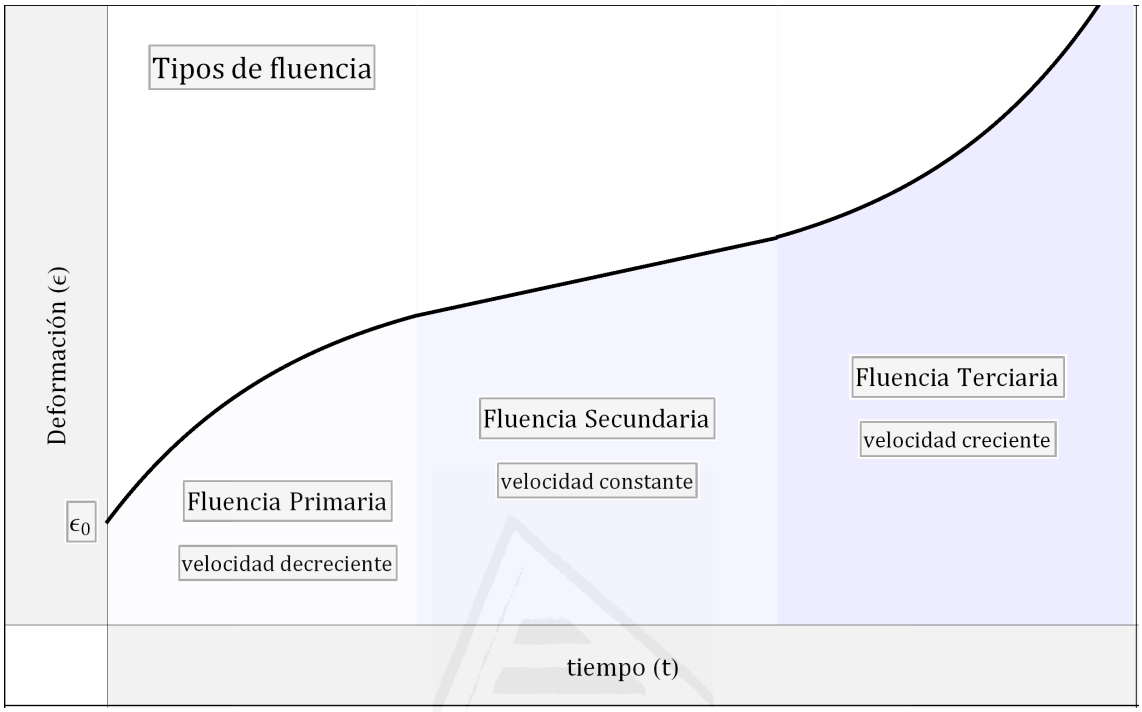


Figura 3- Fases típicas de fluencia. ε_0: deformación elástica instantánea.

En rocas porosas, que son las que trataremos aquí, están claramente establecidas las tres fases de fluencia, aunque aquí se estudiará el régimen de fluencia primaria, que es al que están sometidos los materiales en condiciones de servicio.

En los párrafos sucesivos se describen una serie de trabajos en los que se estudia la fluencia mediante modelos constitutivos que en algunos casos hacen referencia a modelos reológicos constituidos por resortes, amortiguadores y deslizadores.

Los modelos propuestos utilizan más o menos parámetros, que es preciso determinar para cada tipo de material al que se pueda aplicar el modelo en cuestión. Normalmente el ajuste de estos parámetros se realiza comparando las salidas del modelo con los resultados experimentales, de manera que ambos queden lo más próximo posible.

Algunos trabajos proponen la realización de ensayos concretos para la determinación de los parámetros correspondientes al material ensayado. En algunos casos se aplican redes neuronales para determinar los parámetros a partir de unas

condiciones iniciales. Otras veces se obvian los ensayos en favor de simulaciones numéricas con el mismo objetivo.

Weng *et al*. (2010) estudian una arenisca a partir de resultados experimentales, y proponen un modelo constitutivo (no especifica modelo reológico) en el que la parte viscoplástica está definida por nueve parámetros a determinar mediante ensayos específicos para cada caso. Los ensayos a realizar son el Triaxial (en ciclos de carga-descarga) y el Ensayo de Fluencia en escalones de carga creciente. Los resultados del modelo concuerdan bastante con los obtenidos mediante ensayos. Para adaptar el modelo a otros tipos de roca se propone ampliar las investigaciones. La roca ensayada tiene las siguientes características: porosidad total del 14,1%, densidad seca de 2,3 g/cm^3, contenido de agua en saturación 5,8% y resistencia a compresión uniaxial 37,1 MPa.

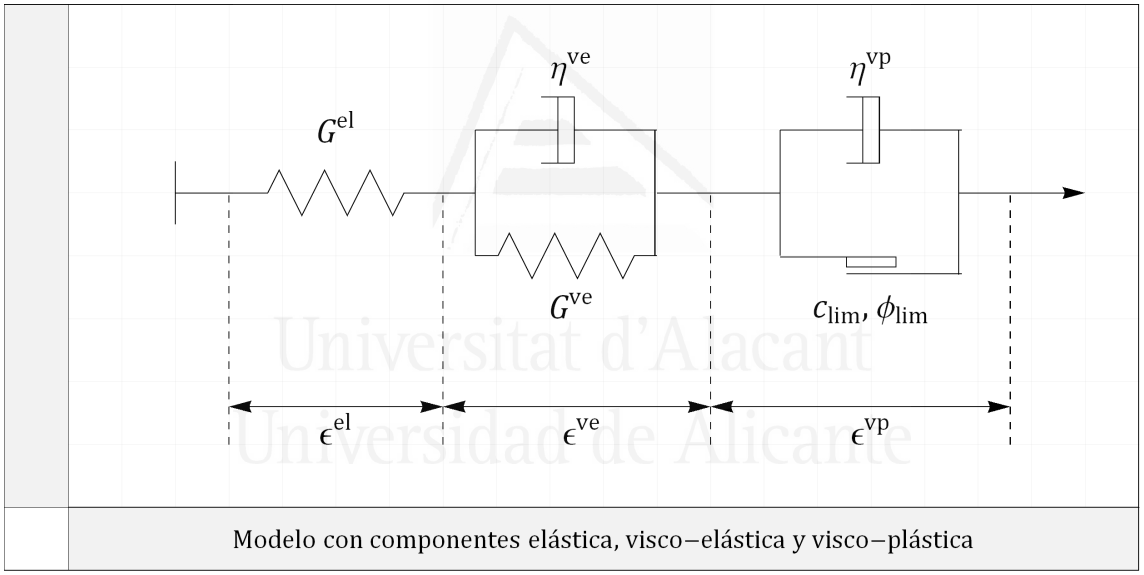


Figura 4- Modelo con componentes elástica, visco-elástica y visco-plástica. G^{el}: rigidez del elemento elástico; G^{ve}, η^{ve}: rigidez y viscosidad del elemento visco-elástico; η^{vp}: viscosidad del elemento visco-plástico; c_{lim}, ϕ_{lim}: cohesión y ángulo de rozamiento que determinan la tensión de inicio de la fase viscoplástica.

Sterpi y Gioda (2009) parten del modelo reológico de Papa y Taliercio (2005) (*Figura 4*) para el estudio de macizos rocosos, compuesto por un resorte en serie con una celda de Kelvin y un amortiguador con deslizador a tensión de umbral. La tensión umbral de este deslizador está determinada por los parámetros de cohesión y ángulo de rozamiento del material. El primero (resorte) refleja el comportamiento

elástico y el segundo (celda de Kelvin) el comportamiento viscoelástico que da cuenta de la fluencia primaria (a velocidad decreciente). El tercer elemento (amortiguador y deslizador) refleja la fase visco-plástica (deformaciones irreversibles) a partir de la tensión de umbral del deslizador. Finalmente, aprovechando otros trabajos anteriores, se relacionan los parámetros de la roca en condiciones de laboratorio con los de la roca en el macizo rocoso, a través del *Rock Quality Designation* (RQD) y del *Rock Mass Rating* (RMR).

Guan *et al.* (2009) parten del modelo reológico de Burger, con deslizador en serie, para establecer las deformaciones por fluencia en túneles. La novedad es que el ajuste de los seis parámetros involucrados se realiza mediante Redes Neurales y Algoritmos Genéticos, partiendo de una aproximación inicial por elementos finitos. En este caso se aplica la técnica a un túnel construido (macizo rocoso de andesita), sobre el que se han medido las deformaciones de una determinada sección a lo largo de 5 años. Después de modelizar numéricamente la sección del túnel, el macizo rocoso y el proceso constructivo, se parte de las condiciones de contorno iniciales resultantes del análisis numérico para alimentar la red neuronal y hallar los parámetros reológicos que se correspondan con el comportamiento observado.

Shao *et al.* (2003) proponen un modelo constitutivo para la fluencia de geomateriales (rocas y hormigón) en el que la fluencia se considera como la consecuencia macroscópica de los cambios producidos en la microestructura. Estos cambios pueden deberse a procesos de degradación de diferente naturaleza (e.g. mecánicos, porosidad, químicos). Se estudian los datos experimentales obtenidos de unas argilitas, aplicando un modelo elastoplástico propuesto para el hormigón, extendido al comportamiento a largo plazo. Para reflejar la evolución de la microestructura se introduce una variable interna en este modelo: un escalar dependiente de la deformación plástica y el tiempo.

Nadimi *et al.* (2011) aplican un modelo constitutivo a una excavación realizada en roca y lo comparan con los desplazamientos realmente medidos. Los parámetros del modelo se determinan mediante ensayos triaxiales de muestras de roca en laboratorio. Se usa un programa de elementos finitos (3DEC) para realizar las simulaciones que se comparan con los datos reales obtenidos en la excavación.

Damjanac y Fairhurst (2010), partiendo del modelo reológico de Burger para la fluencia sin deslizador, analizan rocas cristalinas de rotura frágil. También aquí se aplica este modelo reológico (celda de Kelvin en serie con celda de Maxwell), que puede dar cuenta del comportamiento en este tipo de roca con cuatro parámetros

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

reológicos convenientemente elegidos. Este trabajo trata del comportamiento de rocas cristalinas a escala geológica, como en el caso de depósitos subterráneos de residuos nucleares. En esta situación, el material puede estar sometido a tensiones desviadoras durante largos períodos de tiempo (a diferencia de las rocas débiles en las que las tensiones son siempre de compresión a largo plazo), lo que significa que en las zonas sometidas a tracción, en ambientes agresivos, se puede producir el fenómeno de "corrosión por tensión" descrito por Charles (1959). Se parte de numerosos datos experimentales y trabajos publicados para confirmar que en este tipo de rocas, bajo determinadas tensiones de tracción, "no se observa fluencia secundaria" (deformación a velocidad constante) y existe una "tensión umbral" a partir de la cual se produce el debilitamiento en el tiempo del material (corrosión por tensión) debido a cambios físico-químicos en la estructura del mismo. Esta corrosión por tensión puede hacer que la roca colapse a largo plazo sin llegar a mostrar deformación a velocidad constante (fluencia secundaria).

Jongpradist y Horii (2007) estudian la influencia del contenido de agua en la resistencia y el comportamiento en fluencia de rocas blandas. La resistencia disminuye de manera importante con el aumento de la cantidad de agua y de manera similar aumentan las deformaciones. Para altos contenidos de agua el modo de rotura tiende a ser dúctil. El material ensayado es una piedra artificial para asegurar la homogeneidad y regularidad de los especímenes.

Tsai *et al*. (2003) analizan el efecto del agua en la fluencia y resistencia de areniscas débiles. En la arenisca estudiada, la pérdida de resistencia de la roca saturada con respecto a la seca va desde el 40% en el ensayo triaxial al 52% en el ensayo uniaxial. Berest *et al.* (2005) estudian empíricamente la fluencia muy lenta, a niveles de carga muy bajos (0,1 MPa), llegando a la conclusión de que la velocidad de deformación en estas condiciones no es proporcional a la tensión con respecto al caso de tensiones en niveles de carga normales (5-20 MPa). Vasarhelyi y Van (2006) estudian la influencia del contenido de agua en la resistencia de areniscas, usando datos publicados en otros trabajos. La pérdida de resistencia de la roca saturada con respecto a la seca, en los tipos de roca estudiados, va desde el 5% a más del 50%.

En cuanto a la fluencia en el hormigón, los modelos empíricos dependen de ciertas variables intrínsecas o extrínsecas, según se relaciona en la *Tabla 1*, para cada uno de ellos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Tabla 1 - Factores utilizados por varios código. Traducido de Fanourakis y Ballim (2003).

		SABS 0100 (1992)	BS 8110 (1985)	ACI 209 (1992)	AS 3600 (1998)	CEB-FIP (1970)	CEB-FIP (1978)	CEB-FIP (1990)	RILEM Model B3 (1995)
Factores intrínsecos	Tipo de árido	x							
	Árido/Cemento								x
	Contenido de aire			x					
	Contenido de cemento					x			x
	Tipo de cemento					x	x	x	x
	Densidad del hormigón			x	x				
	Árido fino/total (masa)			x					
	Asiento			x					
	Agua/cemento					x			x
	Contenido de agua								x
Factores extrínsecos	Edad a la puesta en carga	x	x	x	x	x	x	x	x
	Edad de la muestra								x
	Tensión aplicada	x	x	x	x	x	x	x	x
	Resistencia a la puesta en carga	x	x						
	Factor de forma de la sección								x
	Condiciones de fraguado								x
	Resistencia a 28 días			x	x	x	x	x	x
	Duración de la carga			x	x	x	x	x	x
	Espesor efectivo	x	x	x	x	x	x	x	x
	Módulo a la puesta en carga	x	x						x
	Módulo elástico a 28 días	x	x	x	x	x	x	x	x
	Humedad relativa	x	x	x	x	x	x	x	x
	Temperatura							x	x

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Como puede observarse, los códigos analizados en la *Tabla 1* son:

- South African Bureau of Standards, SABS 0100 (1992).
- British Standards Institution – Structural use of Concrete, BS 8110 (1985).
- American Concrete Institute (ACI) Committee 209 (1992).

- Standards Association of Australia-Australian Standard for Concrete Structures – AS 3600 (1988).
- Comité Euro-International du Béton - Fédération Internationale de la Précontrainte (CEB-FIP) Model Code (1970).
- CEB-FIP Model Code (1978).
- CEB-FIP Model Code (1990).
- International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM) Model B3 (1995).

A excepción del RILEM Model B3 (1995), los modelos considerados se derivan de códigos de diseño y expresan la deformación por fluencia como el producto de la deformación elástica en el momento de la carga por un coeficiente de fluencia, dado por una función de fluencia que considera las variables correspondientes en cada caso. El RILEM Model B3 (1995) es más complejo que los otros modelos y tiene una estructura diferente. Contempla el cálculo de dos funciones separadas para la fluencia básica y la fluencia por secado.

Tabla 2 - Coeficientes de variación de los errores de predicción (ω_j) para seis tipos de hormigón (Mix) confeccionados con diferentes áridos y distintas resistencias a compresión uniaxial: Q1 (árido de cuarcita-UCS 37 MPa), Q2 (árido de cuarcita-UCS 65 MPa), G1 (árido de granito-UCS 38 MPa), G2 (árido de granito-UCS 65 MPa), A1 (árido de andesita-UCS 48 MPa), A2 (árido de andesita-UCS 74 MPa). ω_{all}: coeficiente de variación del conjunto de los seis juegos de datos.

Método de predicción	Coeficientes de variación (ω_j)						ω_{all}
	Mix Q1	Mix Q2	Mix G1	Mix G2	Mix A1	Mix A2	
BS 8110 (1985)	29,0	27,4	26,5	8,6	26,9	15,5	23,6
SABS 0100 (1992)	20,1	41,4	26,5	8,6	47,9	26,5	31,3
SABS 0100 (1992) mod.	45,2	17,3	49,5	31,9	34,4	15,2	34,7
ACI 209 (1992)	52,6	36,3	45,7	45,1	60,8	58,4	50,5
AS 3600 (1998)	12,5	n/a	13,4	n/a	47,2	n/a	29,2
CEB-FIP (1970)	18,1	31,3	15,0	12,3	13,9	9,9	18,1
CEB-FIP (1978)	66,0	148,6	53,9	95,1	65,6	112,8	96,1
CEB-FIP (1990)	32,7	19,8	27,7	31,2	39,6	38,3	32,2
RILEM Model B3 (1995)	45,6	29,3	33,0	21,9	45,3	32,6	35,6

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

La exactitud de la predicción de nueve tipos de modelos considerados, se ha estimado en el estudio publicado por Fanourakis (2006), en el que se concluye que el CEB-FIP (1970) es el modelo más preciso (menor coeficiente de variación de los errores ω_j) según se indica en la *Tabla 2*. El coeficiente de variación (ω_j) expresa la desviación estándar como porcentaje de la media aritmética, reflejando una mejor interpretación porcentual del grado de variabilidad que la desviación típica o estándar. A menor coeficiente de variación, mayor precisión en la predicción. Fanourakis y Ballim (2006) no encontraron correlación entre las precisiones en la cuantificación del módulo de elasticidad y de la fluencia total en los modelos considerados. La exactitud de las predicciones no se incrementa con la complejidad del método aplicado ni con el incremento del número de variables consideradas por los modelos. Por lo tanto, en este trabajo de investigación se hará uso del modelo CEB-FIP (2010), por ser la última versión del código más preciso según el estudio mencionado.

1.2.2. Exposición a altas temperaturas.

Muchos de los estudios publicados sobre el efecto del calentamiento en las rocas se refieren a los cambios químicos producidos, reflejados en cambios de color y en la composición mineralógica (Chakrabarti*, et al.*, 1996; Gomez-Heras*, et al.*, 2008; Gomez-Heras*, et al.*, 2010; Hajpal, 2002; Hajpal y Torok, 2004). En relación a los cambios físicos y mecánicos, la porosidad, la densidad y la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas han sido las variables más analizadas (Yavuz*, et al.*, 2010). Las conclusiones generales en este sentido son (Yavuz*, et al.*, 2010): la densidad no varía sustancialmente por debajo de los 500 ^{0}C, la porosidad se incrementa con la temperatura, especialmente a partir de 300 ^{0}C y la velocidad de las ondas P decrece linealmente con la temperatura a partir de 200 ^{0}C.

Un parámetro clave para la utilización de la piedra como material de construcción es la resistencia a compresión uniaxial. Esta variable se ha estudiado sistemáticamente orientada a aplicaciones como sistemas de energía geotérmica o depósitos de almacenamiento de residuos nucleares. En estos casos los ensayos se han realizado a la temperatura objetivo (sin enfriamiento) en lugar de tras un proceso de enfriamiento. En estas condiciones, los trabajos analizados referidos a rocas sedimentarias, muestran diversos resultados. Wu *et al.* (2005) estudian varios tipos de areniscas, detectando mínimos descensos de la resistencia por debajo de 400 ^{0}C con un descenso brusco entre ésta y los 600 ^{0}C, temperatura a la que la resistencia

queda por debajo del 60% del valor en el material intacto. Rao *et al*. (2007) ensayan ocho muestras de arenisca y observan un fuerte incremento inicial hasta los 250 ^{0}C seguido de un moderado descenso hasta los 300 ^{0}C que, no obstante, mantiene una resistencia del 138% de la inicial a esta temperatura. Otros estudios sobre areniscas (Zhang*, et al.*, 1993; Zhang*, et al.*, 2009) encuentran un rápido descenso hasta alcanzar el 60% de la inicial a 200 ^{0}C, luego un incremento hasta el 120% de la inicial a 500 ^{0}C, se mantiene a los 600 ^{0}C, y finalmente decrece hasta el 70% a la máxima temperatura estudiada de 800 ^{0}C. Un reciente estudio (Ranjith Pathegama*, et al.*, 2012) ensaya areniscas hasta los 950 ^{0}C obteniendo resultados diferentes a los anteriores, destacando el significativo incremento hasta el 180% de la resistencia inicial a 600 ^{0}C, con una caída posterior hasta la máxima temperatura de ensayo, temperatura a la que no obstante se mantiene ligeramente por encima de la resistencia inicial. Koca *et al*. (2006) estudian nueve muestras de mármol bajo diferentes temperaturas, observando fuertes descensos en la resistencia después de un ligero incremento inicial. Un aspecto destacable en este trabajo, es que la resistencia a compresión uniaxial del material expuesto a 500 ^{0}C y luego dejado enfriar hasta temperatura ambiente, muestra una resistencia similar a la del material intacto ensayado a 500 ^{0}C. Otro estudio sobre un total de 15 ejemplares de dos tipos de mármol (Ferrero y Marini, 2001) calentados a diferentes temperaturas hasta 600 ^{0}C y luego enfriados con un proceso muy lento, detecta incrementos iniciales de la resistencia, hasta mantenerse prácticamente en el valor inicial a 600 ^{0}C. En cuanto al comportamiento del módulo de elasticidad algunos de los autores mencionados detectan descensos continuos desde las más bajas temperaturas hasta la máxima alcanzada (Ferrero y Marini, 2001; Koca*, et al.*, 2006; Wu*, et al.*, 2005), y otros un endurecimiento inicial hasta 250 ^{0}C (Rao*, et al.*, 2007), hasta 400 ^{0}C (Ranjith Pathegama*, et al.*, 2012) o hasta 600 ^{0}C (Zhang*, et al.*, 2009), seguidos por importantes descensos lineales hasta la máxima temperatura ensayada.

Hay que destacar nuevamente que algunos de los ensayos descritos (Koca*, et al.*, 2006; Ranjith Pathegama*, et al.*, 2012; Rao*, et al.*, 2007; Zhang*, et al.*, 2009) se han realizado a la temperatura objetivo. Wu *et al*. (2005) realizaron ensayos a temperatura objetivo y después del enfriamiento, destacando que la resistencia y el módulo elástico a alta temperatura y después de enfriar decrecen gradualmente con la temperatura alcanzada y exhiben similar tendencia de variación (no especifica el método de enfriamiento). Ferrero (2001) utiliza un enfriamiento muy lento, con un gradiente negativo de 0.23 ^{0}C/min. Koca *et al.* (2006) también ensayaron a temperatura ambiente una muestra previamente expuesta al fuego a 500 ^{0}C.

La *Figura 5* y la *Figura 6* muestran los resultados obtenidos por los autores mencionados para la resistencia a compresión uniaxial y el módulo de elasticidad, respectivamente.

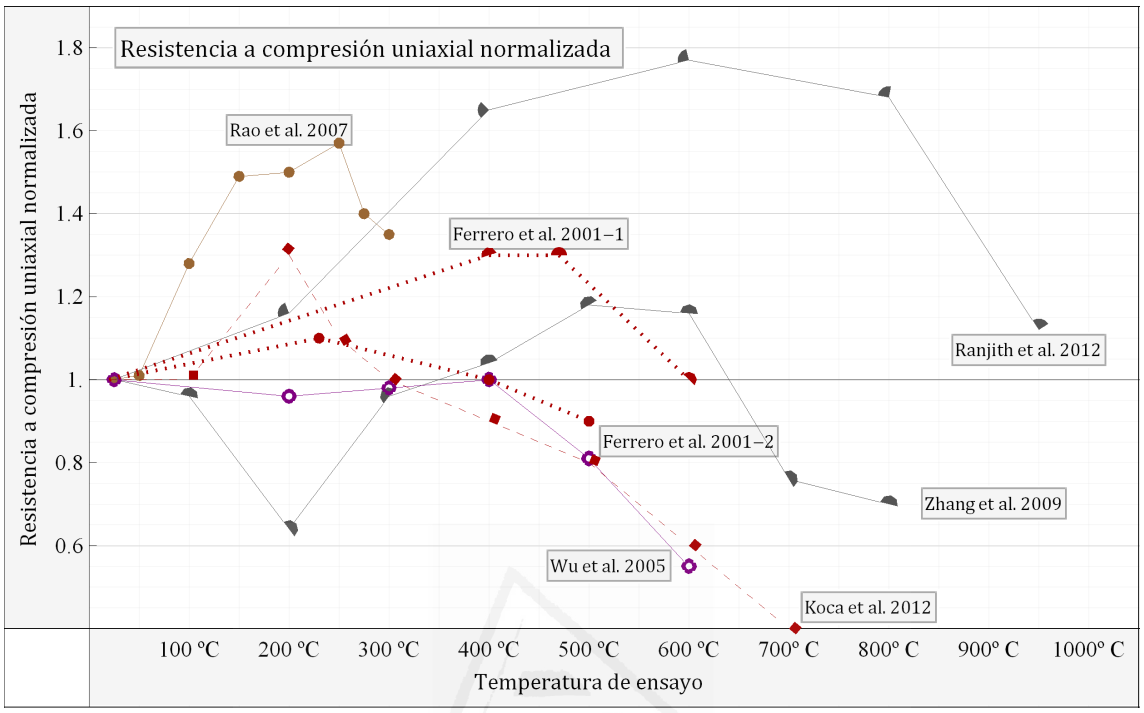


Figura 5- Resistencia a compresión uniaxial normalizada (Brotons, et al., 2013).

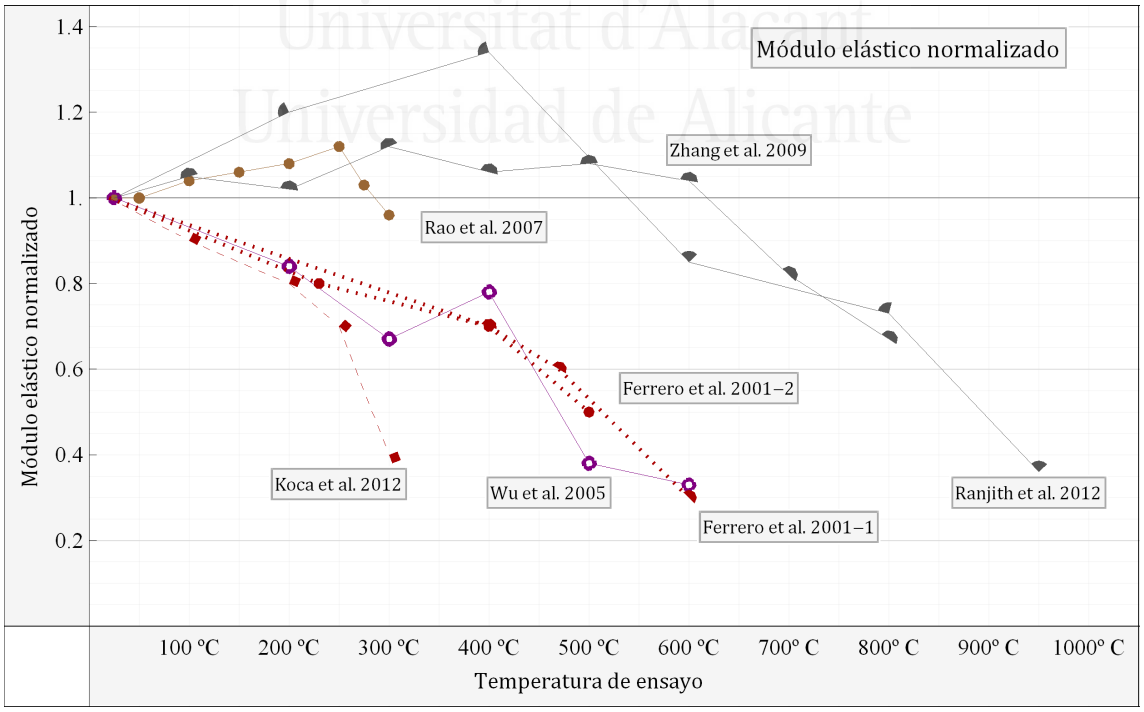


Figura 6- Módulo de elasticidad normalizado (Brotons, et al., 2013).

1.2.3. Relación entre módulos estáticos y dinámicos.

El módulo de elasticidad estático es uno de los parámetros más importantes de cara al empleo de la piedra como material de construcción, puesto que interviene directamente en la rigidez y/o deformabilidad de una construcción. El valor de esta característica varía con el grado de desgaste de la roca por procesos de meteorización, exposición a agentes químicos agresivos, o fenómenos catastróficos (e.g. incendios). Como consecuencia, es necesario conocer el comportamiento característico del módulo elástico ante las acciones expuestas, así como investigar métodos de obtención del módulo fiables y de fácil puesta en práctica. Obviamente, diferentes tipos de roca se comportarán de diferente manera, por lo que se deben estudiar las circunstancias específicas de cada una de ellas. El valor del módulo que interesa, desde el punto de vista estructural, es aquél que se obtiene en condiciones de carga lo más parecidas posible a la del material en servicio, es decir, el módulo obtenido mediante ensayos de deformabilidad ante cargas estáticas, conocido como módulo de elasticidad estático (E_{st}). Estos ensayos requieren la extracción de testigos del material a ensayar, lo que no siempre es posible o conveniente en determinado tipo de edificaciones históricas, aparte de la propia dificultad de perforación según la ubicación del elemento dentro de la construcción, o la necesidad de disponer de equipos pesados y de elevado coste para la perforación y el ensayo posterior en laboratorio. Una alternativa la constituye la obtención de los módulos de elasticidad dinámicos (E_{dyn}) que, fundamentalmente, pueden obtenerse mediante el estudio de la resonancia o la propagación de ondas ultrasónicas en el material. Para los estudios de resonancia en condiciones normalizadas se requiere la extracción de testigos de determinadas dimensiones, para cumplir la asunción de la hipótesis teórica de pieza lineal tipo barra (resonancia en modo longitudinal), aunque el estudio posterior se realiza con equipos ligeros y fácilmente accesibles. El estudio de la propagación de ondas ultrasónicas puede realizarse sobre el elemento constructivo (sin extracción de testigos), además de no requerir equipos pesados.

Los módulos dinámicos que se van a estudiar aquí son los obtenidos mediante el estudio de la propagación de ondas ultrasónicas (V_p y V_s), en nuestro caso en piezas cilíndricas del material aunque, como se ha comentado previamente, el método se puede aplicar a elementos constructivos de dimensiones arbitrarias, únicamente limitadas por la potencia de emisión del equipo utilizado. Estos módulos dinámicos habitualmente son mayores que los estáticos para la mayoría de los materiales, y la divergencia en los valores obtenidos por ambos métodos es mayor cuanto menor es

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

el módulo del material analizado, como se detectó desde los primeros estudios realizados (Ide, 1936). Algunos autores explican las diferencias por la no linealidad de la respuesta elástica con respecto a los distintos rangos de deformación implicados en ambas técnicas de medida (Al-Shayea, 2004; Ide, 1936; Kolesnikov, 2009; Vanheerden, 1987). También se ha considerado la no linealidad de la respuesta elástica frente a las distintas frecuencias de deformación (Ciccotti y Mulargia, 2004; Kolesnikov, 2009) considerando que el ensayo estático es un ensayo dinámico con una frecuencia asociada del orden de 10^{-3} Hz. Kolesnikov (2009) utiliza el modelo de propagación de ondas sísmicas de Q (factor de calidad) constante de Kjartansson (1979) para analizar los efectos de la dispersión intrínseca de las velocidades de fase de ondas de presión en un medio absorbente (las rocas absorben energía de las ondas elásticas en mayor o menor medida). Por medio de ensayos, este autor obtiene una estimación experimental del posible efecto de la dispersión intrínseca en los resultados de la medida del módulo, y concluye que una frecuencia de alrededor de $3x10^{-4}$ Hz se corresponde con el ratio observado de $E_{st}/E_{dyn}=0.57$ (ensayando un material plástico de referencia), y por tanto esta frecuencia debe ser asociada a su ensayo estático. Cicotti (2004) afirma que debido a que la duración media de sus ensayos es de unos 20 minutos, las medidas estáticas pueden ser asociadas a una frecuencia aproximada de 10^{-3} Hz. Ambos parámetros, frecuencia y amplitud de las deformaciones, son parámetros con una posible influencia en el comportamiento viscoelástico del material. Sin embargo Cicotti (2004) ha realizado ensayos sobre muestras de caliza de alta resistencia (más de 75 MPa) cubriendo un amplio rango de frecuencias y amplitudes, y no encontrando una dependencia significativa del módulo medido con respecto a estas dos variables, para este tipo de roca.

Por otra parte, la explicación física de las diferencias entre módulos estáticos y dinámicos más extendida y estudiada, es la que considera el efecto diferencial de los poros, tamaño y orientación espacial de fisuras y planos de estratificación, sobre ambas técnicas de medida (Al-Shayea, 2004; Eissa y Kazi, 1988; Ide, 1936; King, 1983; Vanheerden, 1987). El método estático, cuyo valor cuantifica de manera más precisa la deformabilidad del material en condiciones de servicio, es más sensible a la presencia de discontinuidades en la roca. Sobre una caliza de alta resistencia (unos 70 MPa) Al-Shayea (2004) observa que la relación entre ambos módulos, expresada por la *Ecuación 1* :

$$k = \frac{E_{dyn}}{E_{st}}$$

Ecuación 1

se acerca a la unidad para módulos estáticos medidos a niveles de tensión muy bajos (aproximadamente el 10% de la resistencia a compresión uniaxial). El módulo dinámico se obtiene con la siguiente *Ecuación 2*:

$$E_{dyn} = \rho_{bulk} V_s{}^2 \frac{4V_s{}^2 - 3V_p{}^2}{V_s{}^2 - V_p{}^2}$$

Ecuación 2

Donde:

- E_{dyn} = módulo dinámico
- E_{st} = módulo estático
- ρ_{bulk} = densidad aparente
- V_p = velocidad de propagación de las ondas P (longitudinales)
- V_s = velocidad de propagación de las ondas S (transversales)

En la *Tabla 3* se incluyen las relaciones entre módulos estáticos y dinámicos para diferentes tipos de rocas, con los rangos de validez correspondientes, propuestos por varios autores (Eissa y Kazi, 1988; King, 1983; Martinez-Martinez*, et al.*, 2012; Vanheerden, 1987).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Tabla 3 - Relaciones entre módulos estáticos (E_{st}) y dinámicos (E_{dyn}) propuestas por varios autores. En la ecuación de Eissa y Kazi (1988) ρ_{bulk} está expresada en g/cm³. R^2: coeficiente de determinación.

Referencia	Ecuación	R^2	Número de Muestras	E_{dyn} (GPa)	Tipo de roca
King (1983)	*Ecuación 3*	0.82	174	40-120	Ígneo-metamórfica
Vanheerden (1987)	*Ecuación 4*	-	-	20-135	Arenisca-granito
Eissa y Kazi (1988)	*Ecuación 5*	0.70	342	5-130	Todos los tipos
Eissa y Kazi (1988)	*Ecuación 6*	0.92	76	5-130	Todos los tipos
Martinez-Martinez, et al.(2012)	*Ecuación 7*	-	-	5-50	Caliza-mármol

Las ecuaciones referenciadas en la *Tabla 3* son:

$$E_{\mathrm{st}} = 1.26\, E_{dyn} - 29.5$$

Ecuación 3

$$E_{\mathrm{st}} = \mathrm{a}\, {E_{dyn}}^{\mathrm{b}}$$

Ecuación 4

$$E_{\mathrm{st}} = 0.74\, E_{dyn} - 0.82$$

Ecuación 5

$$\log_{10} E_{\mathrm{st}} = 0.77 \log_{10}\left(\rho_{\mathrm{bulk}}\, E_{dyn}\right) + 0.02$$

Ecuación 6

$$E_{\mathrm{st}} = \frac{E_{dyn}}{3.8\, {\alpha_s}^{-0.68}}$$

Ecuación 7

Hay que señalar que Eissa y Kazi (1988) han realizado un análisis estadístico sobre 76 observaciones extraídas de tres fuentes distintas, en las que se conocía la variable densidad aparente, estudiando doce variables (incluidas E_{st}, E_{dyn}, ρ_{bulk} y otras nueve combinaciones de las anteriores). Cada una de ellas se correlaciona con el resto cubriendo todas las combinaciones posibles, y concluye que la relación que mejor predice (R^2=0.92) el módulo de elasticidad estático a partir del dinámico es la *Ecuación 6*. En la *Figura 7* se pueden ver las gráficas de las ecuaciones incluidas en la *Tabla 3*, trazadas dentro de sus respectivos rangos de validez. La relación de Martínez-Martínez *et al.* (2012) no se ha incluido porque para ello sería necesario asumir una función que relacione la atenuación espacial con el módulo dinámico. La relación de Van-Heerden (1987) está representada por cuatro curvas que se corresponden con cuatro pares de valores de los parámetros *a* y *b* implicados. Estos parámetros cambian con el nivel de tensión aplicado en el ensayo estático, y aquí se han elegido niveles de 10, 20, 30 y 40 MPa. Otro punto a destacar es que para representar la relación no lineal de Eissa y Kazi (1988) se ha supuesto una correlación entre densidad aparente y módulo dinámico basada en datos disponibles en la literatura científica. La relación considerada está expuesta en la propia *Figura 7*.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

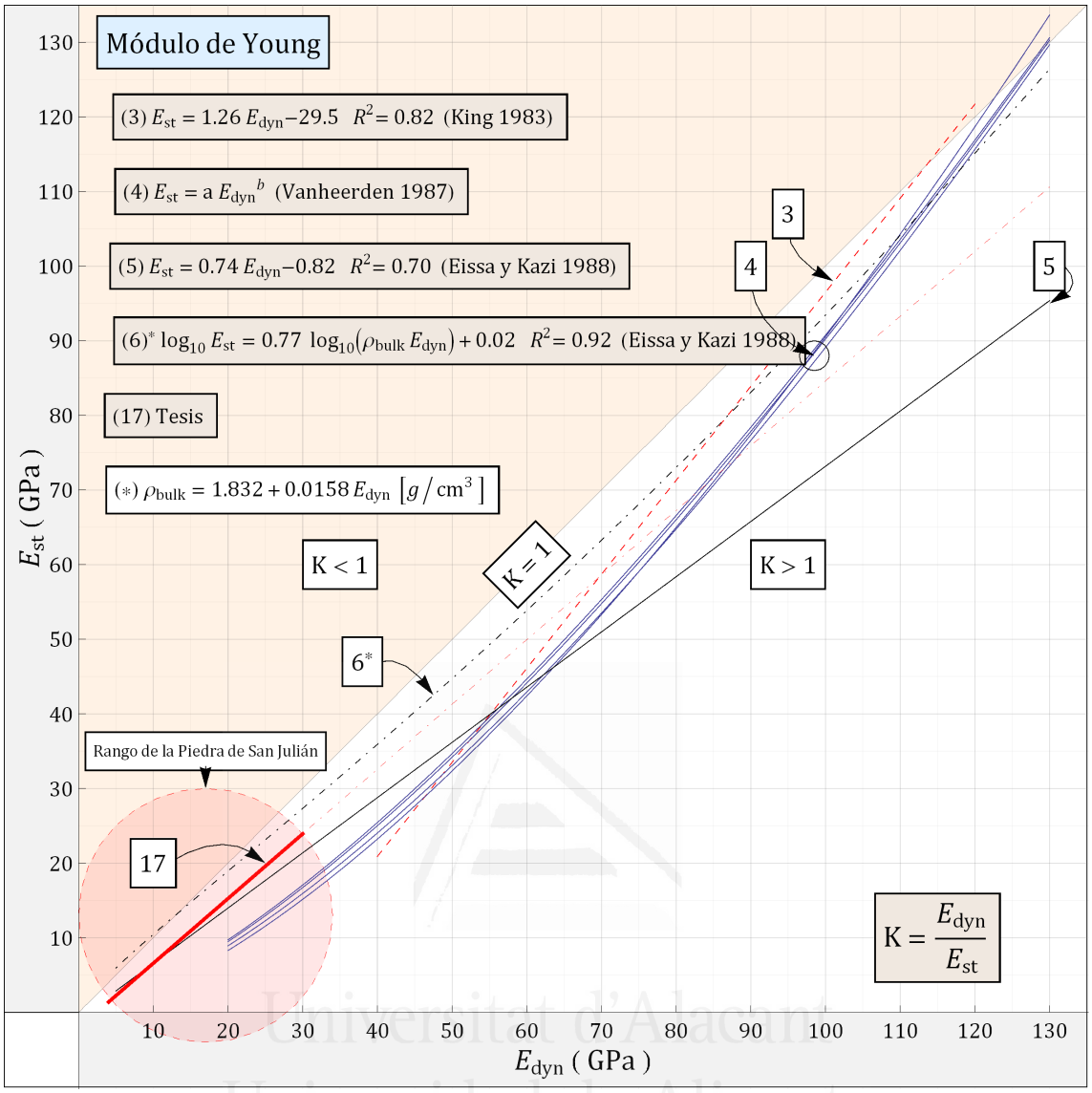


Figura 7- Representación de las relaciones entre módulos estáticos y dinámicos propuestas por varios autores e incluidas en la Tabla 3 (Brotons, et al., 2014).

Todas las curvas están localizadas en la región de k > 1, esto es, que los módulos dinámicos son en general más altos que los estáticos. El rango que se ha representado alcanza hasta los 130 GPa de módulo dinámico.

La tendencia general de todas las curvas, excepto la lineal de Eissa y Kazi (1988), es una disminución del valor de k con el aumento del módulo dinámico, lo cual combinado con valores de k > 1 lleva a valores muy próximos a la unidad para materiales con altos módulos de elasticidad dinámicos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Resumiendo, las principales conclusiones de los trabajos publicados indican que los módulos dinámicos son más altos que los estáticos, y que tienden a converger a medida que aumenta el valor del módulo dinámico medido.

1.3. Objetivos de la investigación

En el siguiente apartado se describen los objetivos de la tesis.

El objetivo general es la caracterización física y mecánica de la Piedra de San Julián, una calcarenita bioclástica ampliamente utilizada en la construcción de edificios históricos de la ciudad de Alicante. De manera más específica, las propiedades estudiadas son aquéllas que interesan desde el punto de vista de la utilización de la piedra como material de construcción. Se pretende conocer el comportamiento a largo plazo bajo cargas gravitatorias, y la respuesta a fenómenos catastróficos como son los incendios. Otro aspecto del mismo problema lo constituye la validación y ajuste de métodos de diagnóstico no destructivos y de fácil puesta en práctica. Los trabajos necesarios para conseguir los objetivos expuestos se han abordado en tres grandes bloques, que coinciden con los artículos presentados en esta tesis: estudio de la fluencia, efectos del sometimiento de la roca a altas temperaturas y análisis de la correlación entre módulos estáticos y dinámicos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1.3.1. Fluencia.

El primer trabajo de esta tesis doctoral consiste en el análisis de la Piedra de San Julián sometiéndola a ensayos de compresión uniaxial a tensión constante durante períodos del orden de 100 horas, controlando las deformaciones con un muestreo variable a lo largo del tiempo de ensayo, según se explica en el capítulo correspondiente a metodología de ensayos.

El material procede del macizo rocoso de la cantera de San Julián en la Serra Grossa de Alicante. En esta zona se han realizado importantes trabajos de estabilización de taludes en los últimos años, por el peligro de desprendimientos sobre zonas pobladas y vías de comunicación de alta intensidad de tráfico. Las muestras aquí analizadas se han extraído durante la excavación del túnel del TRAM (tranvía), por el que circulará todo el tráfico procedente de (y hacia) la zona norte de la provincia (e.g. Denia, Benidorm, El Campello) en su entrada a la ciudad de Alicante. Todo lo anterior hace que sea muy importante conocer las características y el comportamiento esperado a largo plazo del material estudiado.

El objeto es el establecimiento de un modelo que reproduzca el comportamiento a medio plazo de la roca ensayada y, por otra parte, extrapolar los resultados a períodos mayores mediante la asimilación a los modelos de fluencia en el hormigón, que están ampliamente desarrollados en las distintas normativas.

El estudio se va a limitar a la fluencia dentro de los límites elásticos del material, o fluencia primaria, dado que se trata de estudiar el comportamiento del material en condiciones normales de servicio, esto es, con niveles de tensión muy por debajo de la resistencia límite de la roca (Louis Cereceda*, et al.*, 2001). En estas condiciones, el modelo reológico que se propondrá puede prescindir de la parte de deslizamiento a umbral de deformación.

Se pretende asimilar el modelo propuesto al comportamiento en fluencia de un hormigón, calculado según los procedimientos del "Código-Modelo 2010" del FIB (2010), recogido en gran parte por la normativa española.

1.3.2. Exposición a altas temperaturas.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, la Piedra de San Julián ha sido ampliamente utilizada en la construcción de edificios históricos en la ciudad de Alicante. Además, macizos rocosos de esta composición han sido objeto de perforación de túneles y estabilización de taludes de los que dependen importantes vías de comunicación, y la propia seguridad de varias zonas habitadas afectadas por el área de influencia de estos taludes. En consecuencia, es importante conocer el comportamiento de este material ante diferentes agentes agresivos, y en este caso se va a estudiar el efecto del sometimiento a altas temperaturas similares a las que podría inducir un incendio, sobre algunas características físicas y mecánicas de la roca. El calor produce cambios físicos y químicos, a partir de ciertas temperaturas, en la estructura interna del material. Las rocas están compuestas de partículas minerales, matriz, cemento, fisuras y poros. La geometría y la densidad de las fisuras y poros son los principales parámetros que determinan las características mecánicas (Yavuz*, et al.*, 2010). El calentamiento induce micro-fisuras debido a la diferente naturaleza de los minerales constituyentes (intergranulares) (Jansen*, et al.*, 1993) o en los propios granos (intragranular). El proceso de enfriamiento también puede producir diferentes grados de fisuración, en función de los gradientes térmicos producidos. El principal objeto de esta parte de la tesis es la determinación de la influencia de la temperatura y del proceso de enfriamiento en las características

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

mecánicas de la Piedra de San Julián. Con este propósito se realizarán ensayos de resistencia a compresión uniaxial, deformabilidad, durabilidad según el *Slake Durability Test*, porosidad, y propagación de ondas ultrasónicas, antes y después de someter el material a diferentes temperaturas y procesos de enfriamiento.

1.3.3. Relación entre módulos estáticos y dinámicos.

El módulo de Young o elástico, es un importante parámetro mecánico de las rocas en relación con su uso como material de construcción. Este parámetro varía con el tiempo, bien sea debido a debilitamiento producido por fenómenos naturales (e.g. meteorización o reacciones químicas de salinización) o por fenómenos catastróficos como incendios. En cualquier caso, es importante conocer el módulo elástico en casos puntuales en los que sea necesario evaluar los efectos del tiempo, o de circunstancias catastróficas, sobre la estabilidad estructural de construcciones en los que esté implicado el material en cuestión. En estos casos, el módulo que nos interesa es el que se obtiene mediante ensayos estáticos de deformabilidad, que reproducen las condiciones de servicio a las que estará sometido el material. Sin embargo, esto requiere la extracción de testigos y su ensayo en laboratorio. La alternativa no destructiva es el estudio de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas y el cálculo de los módulos dinámicos a partir de esta velocidad. Estos ensayos, además de ser no destructivos, presentan la ventaja de requerir un equipo ligero y de bajo coste, con lo que se pueden realizar los ensayos *in situ* sobre los puntos de interés, obteniendo los resultados de una manera inmediata.

Los módulos dinámicamente determinados, no obstante, son en general más altos que los estáticos, y los resultados son más divergentes cuanto menor es el módulo estático de la roca intacta (Ide, 1936). Existen varias explicaciones para estas diferencias, pero la más común considera el efecto diferencial de la porosidad, tamaño y orientación espacial de fisuras y planos de estratificación, sobre ambas técnicas de medida (Al-Shayea, 2004; Eissa y Kazi, 1988; Ide, 1936; King, 1983; Vanheerden, 1987).

El objetivo de esta tesis es investigar la relación entre ambos módulos para este tipo de roca. Para ello se someterán muestras de la roca a desgaste acelerado por choque térmico, obteniendo luego los módulos por métodos estáticos y dinámicos. Un posterior análisis estadístico extendido a varios modelos de correlación, permitirá

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

determinar cual de éstos es el más adecuado para predecir el módulo estático a partir del dinámico. Concretamente, se pretende el ajuste y la validación de este método para estudiar el estado de desgaste del material analizado.

1.4. Rationale

Esta tesis doctoral está centrada en el estudio de la Piedra de San Julián orientada a su uso como material de construcción. En este sentido se investigan el comportamiento de la deformabilidad a largo plazo bajo carga constante o fluencia, los efectos de la acción del fuego y la relación entre módulos estáticos y dinámicos. La fluencia en las rocas es un fenómeno poco estudiado si lo comparamos con la abundante literatura que existe sobre este tema para el hormigón. En contraste con los períodos estudiados para este material, los trabajos de fluencia en roca existentes suelen abarcar períodos cortos, y por otra parte no se ha establecido ninguna metodología que permita comparar las distintas fuentes, o inferir comportamientos más allá del período estudiado. En el primer artículo presentado en esta tesis se realiza un análisis del modelo de fluencia para hormigón desarrollado en el Código modelo FIB (2010) y se sintetiza la información expuesta en los diversos apartados sobre este tema, exponiendo una ecuación que permite obtener la evolución temporal de la deformación unitaria en función de la carga aplicada y las características propias del hormigón utilizado. Por medio de ensayos de duración media se obtiene la fluencia de la roca estudiada y, utilizando la ecuación obtenida anteriormente, se propone un tipo de hormigón que tendría el mismo comportamiento en el período ensayado. A continuación se adapta la ecuación del hormigón de manera que pueda utilizarse utilizando los parámetros de la roca. Hay que destacar que la experiencia existente con el hormigón incluye estudios de fluencia de hasta 30 años (FIB, 2010). Con esta adaptación podría aceptarse que la ecuación expuesta en este trabajo, para este tipo de roca, es válida para períodos mucho más allá de los ensayados. El paralelismo entre roca y hormigón en este aspecto es novedoso y permite extrapolar los resultados de ensayos de duración moderada. El segundo artículo presentado trata de los efectos del sometimiento a un proceso de calentamiento sobre las propiedades mecánicas de la roca. Los efectos del posterior proceso de enfriamiento se analizan dejando enfriar la mitad de las muestras al aire y sumergiendo en agua las otras inmediatamente. Se obtienen las gráficas que relacionan temperatura alcanzada y proceso de enfriamiento con la variación de las características elásticas y mecánicas de la roca, destacando las acusadas pérdidas de resistencia a compresión y módulo elástico. Estos datos pueden

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

servir para predecir el estado de conservación de una obra afectada por un incendio si se conoce la temperatura máxima alcanzada (carga de fuego, duración) o para estimar la temperatura alcanzada analizando el material. En el tercer artículo (aceptado), se investiga la relación entre módulos estáticos y dinámicos. Existe mucha literatura sobre el tema, aunque ninguna para este tipo de roca. El módulo de elasticidad estático es un parámetro importante que interesa conocer, por ejemplo, si se proyecta realizar una intervención sobre una edificación que varíe las cargas aplicadas. También puede ser un indicador del grado de debilitamiento del material ante eventos catastróficos como incendios. La obtención tradicional de este parámetro requiere la extracción de testigos del material y el ensayo en laboratorio equipado adecuadamente. El módulo dinámico, obtenido mediante el estudio de la propagación de ondas ultrasónicas a través del material, no sólo requiere equipos relativamente accesibles y portátiles, sino que puede llevarse a cabo sin extracción de testigos. El problema que se presenta es que ambos módulos son divergentes, y lo son en mayor medida en rocas de bajo módulo de elasticidad (<50 GPa) como la nuestra. La relación entre los dos módulos depende del módulo estático real y también de la propia naturaleza mineralógica, por lo que es necesario estudiar este tipo de roca en concreto. En esta tesis doctoral se establece una relación obtenida estadísticamente que permite obtener el valor del módulo estático mediante ensayos no destructivos (ultrasonidos).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1.5. Trabajos presentados y justificación de la unidad temática

Los resultados de esta tesis doctoral han sido publicados o aceptados para su publicación en revistas indexadas en el *Journal Citation Reports* (*Science Edition Index SCI*) de *Thomson and Reuters*, de los campos de Tecnología de la Construcción y Edificación (*Construction and Building Technology*) y de Ingeniería Geológica (*Geological Engineering*) durante 2013-2014:

- *Materiales de Construcción* es una revista de prestigio a nivel mundial en el campo de la Tecnología de la Construcción y Edificación, que ocupa la 27ª posición de un total de 57 revistas indexadas en esta área temática (Q2) y presenta un factor de impacto de 0.788, todo ello referido al último año del que se han publicado estadísticas (2012).
- *Engineering Geology* es una de las revistas con más prestigio en el campo de la Ingeniería Geológica, que ocupa la 6ª posición de un total de 32 revistas

indexadas en esta área temática (Q1) y presenta un factor de impacto de 1.403 (2012).

- *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* es una revista que ocupa la posición 23ª de un total de 32 en el campo de la Ingeniería Geológica (Q3), y tiene un factor de impacto de 0.617 (2012).

Los artículos, que se adjuntan en la segunda parte de esta memoria y que conforman el compendio con el que se presenta esta tesis, son los siguientes:

- Artículo 1º. Brotons, V., Ivorra, S., Martínez-Martínez, J., Tomás, R., Benavente, D.: *"Study of creep behavior of a calcarenite: San Julián´s stone (Alicante)"*, Materiales de Construccion, Vol. 63, n. 312 (2013), pp. 581-595. doi: 10.3989/mc.2013.06412.
- Artículo 2º. Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Alarcon, J.C.: *"Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian´s calcarenite"*, Engineering Geology, Vol. 167, n. (2013), pp. 117-127. doi: 10.1016/ j.enggeo. 2013.10.012.
- Artículo 3º. Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A.: *"Relationship between static and dynamic elastic modulus of a calcarenite heated at different temperatures: the San Julián's stone"*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. BOEG-D-13-00162R3, n. (2014), pp. doi: 10.1007/s10064-014-0583-y. (aceptado).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

En el primer artículo se realiza un análisis del modelo de fluencia para hormigón desarrollado en el Código Modelo FIB (2010) y se sintetiza la información expuesta en los diversos apartados sobre este tema, exponiendo una ecuación que permite obtener la evolución temporal de la deformación unitaria en función de la carga aplicada y las características propias del hormigón utilizado. Como se ha dicho, la información sobre el comportamiento reológico del hormigón está distribuida a lo largo del Código, en los diversos artículos que analizan los efectos de aspectos concretos (e.g. humedad de curado, temperatura, tipo de árido). Previamente a la selección del Código FIB (2010), se consideraron otras normas que no se incluyen en el artículo debido a limitaciones de extensión:

- South African Bureau of Standards (SABS-0100, 1992).
- British Standards Institution – Structural se of Concrete (BS-8110, 1985).
- American Concrete Institute (ACI) Committee 209 (ACI, 1992).
- Standards Association of Australia-Australian Standard for Concrete Structures (AS-3600, 1988).

- International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM-Model_B3, 1995).

El resultado comparativo mostró la conveniencia de utilizar el Código Modelo (FIB, 2010).

Una vez obtenida la ecuación integrada de la deformación unitaria temporal bajo carga constante se procedió a la realización de ensayos de duración media para obtener la fluencia de la roca estudiada. A continuación, se definió un tipo de hormigón cuyo comportamiento en fluencia durante el período ensayado, calculado según la ecuación obtenida antes, se ajustaba al observado en la roca. Este hormigón, definido por su resistencia a compresión uniaxial a 28 días, tipo de cemento y tipo de árido, tiene una resistencia muy similar a la de la roca estudiada.

También se ha utilizado en este trabajo un modelo reológico de cuatro celdas de Kelvin, con el fin de reproducir el comportamiento en fluencia de la roca estudiada. Este modelo reológico se ha ajustado a los parámetros del modelo FIB (2010) a fin de reproducir el comportamiento de la función previamente definida durante un periodo de carga de 10.000 días de la siguiente forma: En primer lugar la ecuación se ha discretizado con el fin de tratarla como una tabla de datos tiempo-deformación, en segundo lugar se ha ajustado por mínimos cuadrados la función que representa el comportamiento del modelo reológico a estos datos, y como consecuencia de ello se han obtenido los parámetros del modelo. La elección del número de celdas en el modelo de Kelvin está determinada por la precisión requerida para el ajuste (FIB, 2010)/Modelo reológico. En este caso, el coeficiente de determinación (R^2) es de 0,99.

Considerando estos datos se adapta la ecuación del hormigón de manera que pueda utilizarse introduciendo los parámetros elásticos de la roca. Hay que destacar que la experiencia existente con el hormigón incluye estudios de fluencia de hasta 30 años (FIB, 2010). Con esta adaptación podría aceptarse que la ecuación expuesta en este trabajo, para este tipo de roca, es válida para períodos mucho más allá de los ensayados. El modelo de fluencia propuesto en base a las propiedades mecánicas de las rocas, proporciona una buena aproximación al comportamiento de fluencia de la roca estudiada, en el período indicado. La constatación de que el tipo de hormigón cuya curva de fluencia sigue de cerca el comportamiento de la roca ensayada, tiene una resistencia a compresión uniaxial en el momento de carga (es decir, el 98,9% de la máxima resistencia esperada) prácticamente igual a la obtenida en nuestros ensayos para la roca seca, sugiere la existencia de algún paralelismo entre el comportamiento en fluencia del hormigón y el de la roca, y como consecuencia, la

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

posibilidad de intentar la adaptación del código (FIB, 2010) para modelizar la fluencia de las rocas más allá del período ensayado deberá ser más estudiada en futuras investigaciones.

El segundo artículo presentado trata de los efectos del sometimiento a un proceso de calentamiento (con dos modalidades de enfriamiento posterior) sobre las propiedades mecánicas de la roca. Se han utilizado 55 muestras, de las que 5 se han calentado a 100 ^{0}C y se han considerado como de referencia del material intacto. El calentamiento se ha utilizado para eliminar la humedad de las probetas y conseguir condiciones de ensayo homogéneas para todas las muestras. El resto se han calentado en grupos de 10 unidades a 200, 300, 400, 500 y 600 ^{0}C, la mitad de cada grupo se ha dejado enfriar al aire a temperatura ambiente, y la otra mitad se ha sumergido en agua nada más salir del horno. Antes y después del proceso térmico se han ensayado:

- Porosidades abierta y total.
- Atenuación de las ondas ultrasónicas.
- Módulo de Young (estático y dinámico).
- Coeficiente de Poisson (estático y dinámico).
- Resistencia a compresión uniaxial (estático).
- Durabilidad según el Slake Durability Test.

Los ensayos destructivos obviamente se han realizado después del proceso de calentamiento, y se han comparado con el grupo de referencia. Estos resultados han permitido establecer los efectos de la temperatura sobre cada una de las propiedades estudiadas, resaltando los importantes descensos de la resistencia a compresión y del módulo elástico, y la influencia del proceso de enfriamiento sobre todo en la resistencia a compresión. El proceso de calentamiento se ha realizado mediante horno eléctrico, la curva de calentamiento ha sido ajustada de manera que la temperatura máxima se alcanzase en 1 hora –debido a que se querían evitar gradientes de temperatura altos que pudieran provocar tensiones por dilatación diferencial durante el calentamiento-, seguida por otra hora de mantenimiento. Futuros trabajos deberán realizarse en condiciones más similares a las sufridas durante un incendio, teniendo en cuenta que el objetivo último de esta línea de investigación es la aportación de conocimiento de base para la gestión y conservación del patrimonio histórico arquitectónico.

En el tercer artículo (aceptado), se investiga la relación entre módulos estáticos y dinámicos. Se utilizan 24 muestras sometidas a diferentes niveles de deterioro por proceso térmico, y se obtienen sus módulos elásticos estáticos y dinámicos. El análisis

estadístico de las relaciones entre ocho variables o combinaciones de variables, plasmado en una matriz de coeficientes de correlación, permite obtener dos fórmulas analíticas, ambas con un alto coeficiente de determinación. La primera de las ecuaciones -lineal- correlaciona ambos módulos exclusivamente. En la segunda -no lineal- intervienen los módulos y la densidad aparente. La dispersión aleatoria de los residuos del ajuste alrededor del eje horizontal, indica la idoneidad del ajuste lineal. Por otra parte, la correlación entre densidad y módulo dinámico es muy baja en nuestra roca, lo que desaconseja el ajuste no lineal. Los resultados se han comparado con los trabajos de varios autores para otros tipos de roca, siendo consistentes en cuanto a tendencia de variación y órdenes de magnitud. Se concluye que las expresiones presentadas en este artículo pueden ser útiles en el análisis y evaluación de la integridad de construcciones históricas, usando técnicas no destructivas.

Resumiendo, los tres artículos presentados, en conjunto, aportan un mayor conocimiento de la Piedra de San Julián en los aspectos relacionados con su uso como material de construcción. Las conclusiones sobre la fluencia, comportamiento frente a procesos térmicos y la relación entre los módulos estáticos y dinámicos derivadas de la tesis, resultan de gran utilidad en la planificación de trabajos de conservación e intervención sobre edificios y construcciones civiles. En la mayoría de las construcciones que forman parte del Patrimonio Histórico de la ciudad de Alicante se ha utilizado este material, e importantes infraestructuras discurren sobre, o a través del mismo. Es pues manifiesta la utilidad de este trabajo en las circunstancias expuestas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2. Metodología, Hipótesis y Plan de Trabajo

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2. Metodología, hipótesis y plan de trabajo

2.1. Metodología

2.1.1. Recogida y preparación de muestras

El material procede del macizo rocoso de la cantera de San Julián en la Serra Grossa de Alicante. En esta zona se han realizado importantes trabajos de estabilización de taludes en los últimos años, por el peligro de desprendimientos sobre zonas pobladas y vías de comunicación de alta intensidad de tráfico. Las muestras aquí analizadas se han extraído durante la excavación del túnel del TRAM (tranvía), por el que circulará todo el tráfico procedente de (y hacia) la zona norte (Denia, Benidorm, El Campello, Playa de San Juan…) en su entrada a Alicante (*Figura 8*). Una vez en laboratorio, los bloques de piedra fueron taladrados con broca hueca para obtener elementos cilíndricos a los que se les cortaron las puntas para obtener probetas cilíndricas de las dimensiones deseadas. Los bloques fueron sometidos a una previa selección visual, así como luego las probetas, con el fin de evitar en lo posible irregularidades muy marcadas, como planos de estratificación inclinados respecto a la directriz de la pieza, bioclastos o elementos aloquímicos en general.

Figura 8 – Boca sur del túnel del TRAM y taludes sobre vías de comunicación en Serra Grossa.

2.1.2. Ensayos comunes

En este apartado se describirá la metodología usada para la realización de los ensayos de caracterización del material, o que son comunes a los artículos presentados. Estos ensayos se ajustan a las diversas normativas usualmente empleadas, como se describirá, y por tanto se hace referencia a las normas correspondientes para más detalles metodológicos. Las normas seguidas son las españolas UNE, y en algunos casos los ISRM: *International Society of Rock Mechanics – Suggested Methods*.

2.1.2.1. Mineralogía

La composición mineralógica de la roca en polvo fue analizada por difracción de rayos X. Los datos se recogieron e interpretaron utilizando el paquete de software XPowder (Martín, 2004). El procedimiento de búsqueda de coincidencia cualitativa se ha realizado con la base de datos de ICDD-PDF2.

2.1.2.2. Porosidad y densidad

Se realizaron ensayos sobre las probetas de roca, para determinar la porosidad abierta y la densidad aparente. Las probetas se han medido en longitud y diámetro, la medida del diámetro se ha obtenido como la media del mismo en los dos extremos y en el centro del eje longitudinal, cada una de ellas tomada en dos direcciones perpendiculares.

Las porosidades abierta y total, así como las densidades real y aparente, se han determinado según la norma UNE-EN 1936 (AENOR, 2007). Se han obtenido los pesos: seco (m_d), sumergido (m_h) y saturado (m_s) de las muestras. La porosidad abierta se calcula por medio de la relación (en porcentaje) entre el volumen de los poros abiertos y el volumen aparente de la probeta, con la *Ecuación 8*:

$$n_0 = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} . 100$$

Ecuación 8

Donde:

- $n_0 = porosidad\ abierta$
- $m_s = peso\ saturado$
- $m_d = peso\ seco$
- $m_h = peso\ sumergido$

La densidad de las partículas minerales se ha obtenido con el método de los picnómetros descrito en la norma UNE 103302 (AENOR, 1994), realizándose tres mediciones para la obtención de cada valor individual. A partir de la densidad de las partículas, de la porosidad abierta y de la densidad aparente de las muestras, se ha determinado la porosidad total:

$$n = \left(\frac{\rho_{sol} - \rho_b}{\rho_{sol}}\right).100$$

Ecuación 9

Donde:

- $n = porosidad\ total$
- $\rho_{sol} = densidad\ de\ las\ partículas$
- $\rho_b = densidad\ aparente$

2.1.2.3. Ultrasonidos (Módulos dinámicos)

Las ondas ultrasónicas se midieron utilizando un equipo emisor-receptor de señal (Panametrics-NDT 5058PR) acoplado a un osciloscopio (Tektronix TDS-3012B), que registra y digitaliza formas de onda, lo que permite su manipulación y almacenamiento. Se utilizaron dos tipos diferentes de transductores Panametric: un par no-polarizado y un par S-polarizado (ondas S). El primer par fue utilizado con el fin de emitir-recibir la onda ultrasónica longitudinal (P) y a partir de ahí estudiar y cuantificar el tiempo utilizado por la onda en recorrer el material. El segundo par de transductores ultrasónicos se empleó exclusivamente para medir la velocidad de propagación de la onda S. Se utilizó un medio de acoplamiento visco-elástico para lograr un buen acoplamiento entre el transductor y la muestra. La frecuencia de ambas parejas de transductores es de 1 MHz. Se han calculado tres parámetros ultrasónicos a partir de cada forma de onda registrada: velocidad de las ondas P (V_p); velocidad de las ondas S (V_s); y atenuación espacial (α_s). La velocidad de las ondas P (V_p) es el parámetro ultrasónico más ampliamente utilizado, y se determina por la relación entre la longitud de la muestra y el tiempo de tránsito del pulso.

El módulo de elasticidad longitudinal dinámico se obtiene a partir de las velocidades de las ondas longitudinales (V_p) y transversales (V_s) mediante la *Ecuación 2*.

La atenuación α_s cuantifica la pérdida de energía durante la propagación de las ondas a través de un material. Esta cuantificación se realizó por comparación de la

amplitud de la señal emitida por el sensor del transmisor y la amplitud de la registrada en la señal recibida por el sensor receptor. Por otra parte, la atenuación espacial se normalizó con respecto a la distancia entre los sensores transmisor y receptor. α_s se calculó según la *Ecuación 10*:

$$\alpha_s\left(\frac{dB}{cm}\right) = \frac{20\log\left[\frac{A_e}{A_{mx}}\right]}{L}$$

Ecuación 10

Donde:

- $\alpha_s = atenuación\ espacial$
- $A_e = amplitud\ de\ la\ señal\ emitida$
- $A_{mx} = amplitud\ de\ la\ señal\ recibida$

2.1.2.4. Ensayos de deformabilidad y resistencia a compresión uniaxial

Las muestras fueron ensayadas en una prensa de 200 KN de capacidad, controlada digitalmente. La medición de la deformación se hizo con galgas resistivas (120 Ω, K=2.1) conectadas a un sistema de adquisición de datos Spider 8-600 Hz de HBM, a través del *software* Catman Easy, que permitió registrar los valores de tensión-deformación durante el tiempo de ensayo. La medición de las deformaciones axiales y transversales se realizó utilizando dos galgas axiales y dos transversales situadas en puntos de la muestra diametralmente opuestos. Las constantes elásticas se obtuvieron de acuerdo a la norma UNE-22950-3 (AENOR, 1990) y la resistencia a compresión uniaxial de acuerdo a la norma UNE-22950-1 (AENOR, 1990).

2.1.2.5. Durabilidad según Slake Durability Test

Este ensayo tiene por objetivo determinar la resistencia de una muestra de roca frente al debilitamiento y la desintegración, cuando es sometida a ciclos de desgaste según los ISRM *Suggested Methods* (ISRM, 1977). Fragmentos de roca de dimensiones normalizadas se introducen en un tambor rotatorio parcialmente sumergido en agua. Se hace girar el tambor a 20 rpm durante 10 minutos, y luego se seca y se pesa el residuo. El porcentaje en peso retenido en cada ciclo, en relación con el peso inicial, es el índice de Sehudes. Las rocas blandas se clasifican normalmente utilizando su índice después de 2 ciclos.

2.1.3. Ensayos específicos

En este apartado se describe la metodología que se refiere específicamente a cada uno de los tres grandes bloques en que se divide esta tesis: Fluencia, Exposición a altas temperaturas y Relación entre módulos estáticos y dinámicos. Como se ha dicho en la exposición sobre el estado del arte, no existe normativa que indique como han de llevarse a cabo los ensayos para la determinación de la fluencia, ni en cuanto al tiempo de ensayo, ni en las cargas a aplicar. De igual forma, el proceso de calentamiento y las temperaturas alcanzadas para el estudio de los efectos térmicos, tampoco están normalizados. Para el estudio de la relación entre módulos se requieren muestras con diferentes grados de debilitamiento, que permitan abarcar un rango de valores de los módulos medidos, suficientemente amplio como para obtener resultados estadísticamente representativos. Aquí se han utilizado los resultados de los ensayos realizados con las muestras calentadas a diferentes temperaturas.

2.1.3.1. Fluencia

Las muestras fueron mantenidas a carga constante a lo largo de todo el período de pruebas de 96 horas. El registro de la deformación en tiempo real se hizo con galgas resistivas conectadas a un sistema de adquisición de datos Spider 8 de HBM, a través del *software* Catman Easy. El muestreo de datos se realizó a una frecuencia de 5 Hz los primeros 30 minutos, 2 Hz los siguientes 90 minutos y a 1Hz las siguientes 10 horas, de manera que las primeras doce horas generaron 77400 datos. A partir de aquí y hasta el final del ensayo de 96 horas, se muestreó a 0,5 Hz. El total de datos tiempo-deformación obtenidos fue de 207000. La medición de las deformaciones axiales y transversales se realizó utilizando dos galgas axiales y dos transversales situadas en puntos de la muestra diametralmente opuestos, y obteniendo la media de cada grupo. El proceso de carga se llevó a cabo en dos rampas (*Figura 9*): la primera hasta 10 kN (4.3 MPa) (etapa 1) y la segunda hasta 40 kN (17.2 MPa) (etapa 3) mantenidos hasta el final de la prueba. La velocidad de carga (0.5 MPa/s) se eligió dentro de los límites recomendados por la norma (AENOR, 1990). Como se ha mencionada anteriormente, el valor de carga constante utilizada en el ensayo de fluencia se obtuvo mediante ensayos preliminares, de modo que la tensión final, mantenida constante durante la prueba, fue del 45% de la resistencia a compresión uniaxial. Las pruebas se realizaron a una temperatura regulada de 25±2° C. Este rango de temperatura

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

asegura que nos mantenemos en la zona plana de la curva de corrección de las galgas utilizadas (que corresponde a corrección nula).

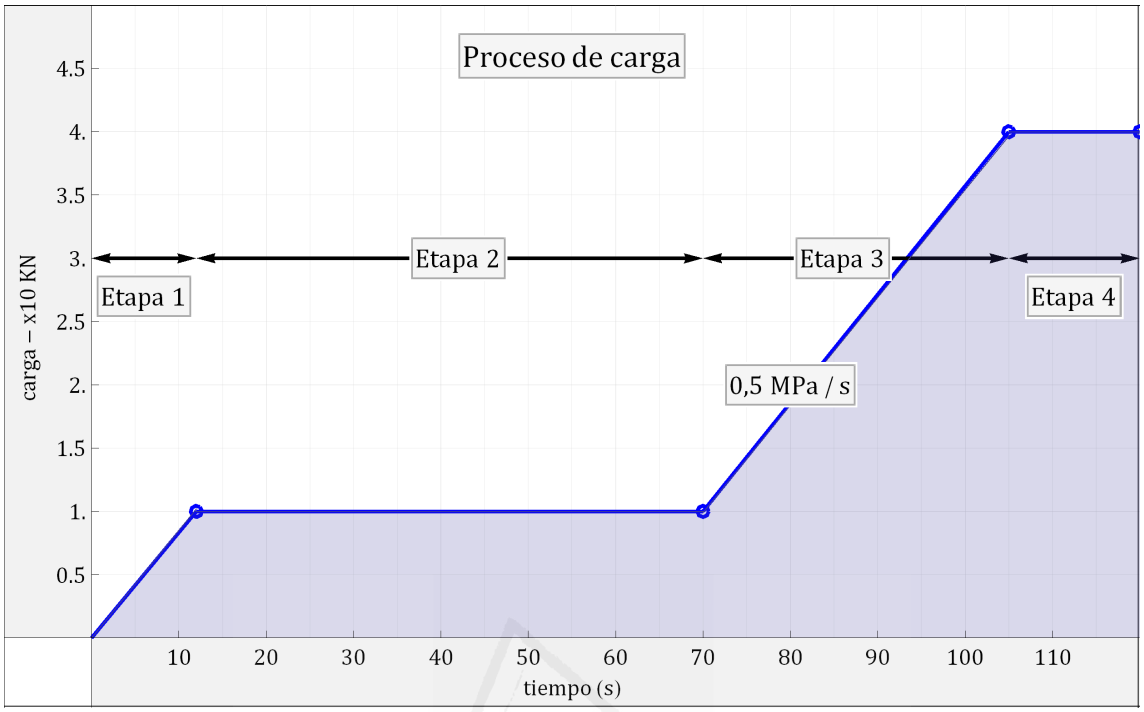


Figura 9 - Rampa de carga

2.1.3.2. Exposición a altas temperaturas

El proceso térmico se llevó a cabo con un horno eléctrico, con gradiente de calentamiento programable. La temperatura del aire en el interior del horno se monitorizó con un termopar, lo que permitió realizar pequeñas correcciones en la programación de las pruebas sucesivas, a partir de los primeros ensayos. Para los ensayos previos todas las muestras fueron calentadas a 105 ^{0}C, con el objetivo de eliminar todo contenido de humedad. El proceso de calentamiento hasta 200-300-400-500 y 600 ^{0}C se realizó de manera que la temperatura objetivo se alcanzase en 1 hora a partir de los 100 ^{0}C (debido a que se querían evitar gradientes de temperatura altos que pudieran provocar tensiones por dilatación diferencial durante el calentamiento). Las primeras 5 muestras, calentadas a 105 ^{0}C, se utilizaron como material intacto de referencia. Para cada una de las otras temperaturas se utilizaron 10 ejemplares. Inmediatamente después de mantener las muestras durante 1 hora a temperatura objetivo, se enfriaron 5 de ellas al aire y las otras 5 por inmersión en un recipiente con 10 l de agua a temperatura ambiente. Un total de 55 probetas fueron analizadas, 5 como referencia de material intacto para los ensayos destructivos, y 50 sometidas a las temperaturas

comprendidas entre 200 y 600 ^{0}C. Finalmente, las muestras se secaron antes de realizar los siguientes ensayos.

2.1.3.3. Relación entre módulos estáticos y dinámicos

Para este trabajo se utilizaron 24 de las probetas calentadas para el estudio del efecto de la temperatura, que cubrían todas las temperaturas de ensayo. De esta forma se pudo disponer de material con distintos grados de debilitamiento, con módulos de Young dinámicos entre 5-30 GPa, para efectuar diferentes análisis de correlación. Las metodologías usadas en el proceso de calentamiento, la medición de la propagación de ultrasonidos y los ensayos mecánicos, han sido descritas en los apartados anteriores.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2.2. Hipótesis

2.2.1. Fluencia

Se parte de la suposición de que el comportamiento en fluencia de la roca se va a poder asimilar, con las correcciones necesarias, al del hormigón. Como material pétreo, el hormigón tiene una composición química –y un proceso de formación- obviamente diferente al de la Piedra de San Julián. Sin embargo, el proceso de fluencia depende esencialmente de las características físicas del material. Las deformaciones a largo plazo debidas a cambios en la composición química, en un ambiente poco agresivo o normal, son mucho menores o inexistentes.

Una característica propia del hormigón es su largo proceso de curado, así como la importante influencia de las condiciones de humedad y temperatura en que éste se produce, en las deformaciones a largo plazo bajo cargas gravitatorias. Esta diferencia con la roca, se puede salvar aprovechando que en el modelo de fluencia utilizado en este estudio se contempla la edad del hormigón en el momento de puesta en carga. Así pues, utilizaremos un hormigón muy curado, en el que las reacciones químicas debidas a éste ya son muy residuales o inexistentes, y sus características físico-mecánicas han alcanzado prácticamente el 100% del máximo esperable a tiempo infinito según la propia norma. En estas condiciones, las diferencias de composición mineralógica no son decisivas en la deformación a largo plazo. Una vez establecido el paralelismo buscado, se podrá modelizar el comportamiento en fluencia a largo plazo de la roca realizando ensayos de duración moderada.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Los ensayos realizados para la determinación de las deformaciones a largo plazo de elementos de hormigón sometidos a cargas gravitatorias, son muy numerosos y abarcan períodos tan amplios como 30 años de duración (FIB, 2010). La importancia de esta experiencia acumulada es decisiva, teniendo en cuenta que las bases de conocimiento teórico de este fenómeno están limitadas, esencialmente, a la justificación de los resultados obtenidos en los ensayos. Es decir, no hay un planteamiento teórico *a priori* validado por ensayos, sino al contrario.

El objetivo es aprovechar la enorme experiencia acumulada en el estudio de la fluencia del hormigón, para trasladarla a la roca en estudio con las necesarias correcciones y adaptaciones.

2.2.2. Exposición a altas temperaturas

Se parte de la hipótesis de que el sometimiento a altas temperaturas debe afectar de manera acusada a las características elástico-resistentes de la roca. El proceso de enfriamiento también afectará de alguna manera a estas propiedades. Se trata de cuantificar la influencia de estos procesos según la temperatura alcanzada y el método de enfriamiento. Se parte de la idea de que, en este tipo de roca carbonatada, los cambios se acusarán a partir de temperaturas relativamente bajas, dentro del rango de las estudiadas.

2.2.3. Relación entre módulos estáticos y dinámicos

La importancia de determinar dinámicamente los módulos de deformación bajo cargas estáticas se ha explicado en los apartados precedentes de la tesis. La posibilidad de realizar inspecciones del estado del material no destructivas se revela muy útil, en particular en edificios de importancia histórico-cultural. Se parte de la hipótesis de que ambos módulos se van a poder correlacionar, en la roca estudiada, con un alto coeficiente de determinación, lo que permitirá establecer una ecuación que permita obtener el módulo estático a partir del dinámico. Siendo una roca de bajo módulo de elasticidad, la divergencia entre los módulos estático y dinámico también debe ser alta.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2.3. Plan de trabajo

El plan de trabajo se desglosa en una parte común a todas las líneas de investigación, como es la recogida de muestras y caracterización físico-mecánica del material, una segunda parte consistente en la realización de los ensayos específicos de cada línea, y una tercera de análisis de datos y conclusiones.

La recogida de muestras se llevó a cabo retirando bloques de la excavación del túnel del TRAM a través de la Serra Grossa, situada al NE de la ciudad de Alicante (38°21'17.32"N - 0°27'48.90"O). Los bloques de roca se retiraron en un plazo no mayor de una semana después de su acopio en obra como material de desecho de la excavación, de manera que no se vieran afectados por la meteorización y se pudiera disponer de un material intacto para la caracterización. Como primera medida, durante la recolección se seleccionaron materiales lo más homogéneos posible desde el punto de vista de una inspección visual. Una vez en laboratorio, se taladraron mediante broca hueca de 52 mm, obteniendo cilindros de diferentes longitudes y puntas irregulares. Un centenar de estos cilindros fueron sometidos a una nueva selección para determinar los puntos de corte de los extremos, evitando planos de estratificación o discontinuidades muy marcadas (los extremos sobrantes fueron guardados en bolsas con la numeración de las probetas de origen), con objeto de tallar probetas de 120-150 mm no afectadas en lo posible por discontinuidades como planos de estratificación. Finalmente las probetas cilíndricas seleccionadas (unas 80) se sometieron a un nuevo proceso de selección para destinar 10 de ellas para los ensayos de fluencia y 55 para el estudio de los efectos provocados por el sometimiento a altas temperaturas y la relación entre módulos estáticos y dinámicos.

Las muestras se caracterizaron desde el punto de vista mineralógico mediante ensayos de difracción de rayos X, inspección al microscopio y fuentes bibliográficas. La caracterización física se llevó a cabo mediante ensayos para la determinación de la densidad aparente, porosidad abierta y total, así como el estudio de la velocidad de propagación de ondas de presión (longitudinales y transversales) a una frecuencia de 1 MHz. Este último permite la determinación de los módulos de elasticidad en comportamiento dinámico. La caracterización mecánica del material intacto, que requiere ensayos destructivos, se realizó únicamente con una parte de las muestras.

La primera línea de investigación en el tiempo fue la fluencia bajo carga constante. Como primera aproximación se realizó el trabajo de análisis bibliográfico en cuanto a los estudios existentes en roca. Éste reveló la escasez de estudios y la inexistencia de los mismos para nuestra roca, lo que llevó a la idea de profundizar en el estudio del

hormigón y la posibilidad de buscar analogías y paralelismos, puesto que la literatura científica es muy abundante para este material. Así se realizó un estudio del Código-modelo (FIB, 2010) y se compiló la cuantificación de la fluencia, que está distribuida a lo largo del articulado. Para los ensayos se contó con 10 muestras, 5 para los ensayos destructivos de caracterización y otras 5 para la compresión uniaxial de larga duración. Los ensayos de fluencia de 96 horas de duración, se llevaron a cabo en los meses de abril-mayo, cuando las oscilaciones térmicas día-noche son menores y las temperaturas medias son más próximas a la óptima de funcionamiento sin necesidad de corrección de las galgas extensométricas utilizadas para medir las deformaciones, aunque pronto se hizo patente la necesidad de controlar la temperatura de manera que fuese constante durante el ensayo, lo que se llevó a cabo a continuación mediante la instalación en los puntos conflictivos (conjunto galgas-probeta y célula de carga de la prensa) de elementos calefactores controlados por microprocesador. Los datos fueron filtrados a posteriori para eliminar en lo posible los efectos locales indeseados, debidos a irregularidades en la red de alimentación eléctrica o interferencias por radiofrecuencias parásitas. Una vez obtenidos los datos, el proceso y análisis de los mismos permitió establecer las conclusiones de esta tesis.

La segunda línea de investigación, los efectos del sometimiento a procesos térmicos de elevadas temperaturas, se abordó a continuación iniciando con la necesaria búsqueda de antecedentes. Nuevamente se observó que no existen estudios para nuestra piedra, y la mayoría de los que tratan de otras rocas carbonatadas se centran en los cambios químicos producidos, y en menor medida en las características resistentes. El estudio de los antecedentes llevó a la decisión de no ir más allá de los 600 ^{0}C por dos motivos: uno es que a partir de 700 ^{0}C se produce una notable descomposición de estas rocas que directamente lleva a desecharlas como material de construcción (esto se comprobó a posteriori), el otro es que en la mayoría de los eventos catastróficos en edificios construidos con este material rara vez, y en muy concretas localizaciones, se alcanza esta temperatura: en Koca*, et al.* (2006) se determina que la temperatura alcanzada en unas columnas de un edificio histórico, expuestas directamente a las llamas de un incendio fue de 500 ^{0}C.

La caracterización previa se realizó a las 55 muestras en lo que se refiere a los ensayos no destructivos, y 5 muestras se utilizaron para los destructivos previos. En el siguiente paso se realizó el sometimiento a los procesos térmicos a 5 temperaturas máximas entre 200-600 ^{0}C, en grupos de 10 probetas. Esto permitió que se ensayaran dos procesos de enfriamiento distintos para cada temperatura como se describe en la

metodología. Una vez superado el proceso térmico, las muestras se volvieron a someter a todos los ensayos que se habían realizado antes para comparar los efectos del calentamiento, incluyendo finalmente los ensayos mecánicos destructivos que se compararon con las 5 muestras de referencia. El análisis y la representación gráfica posterior permiten obtener las conclusiones que se indican en el capítulo 5.

La última línea corresponde a la relación entre módulos de elasticidad bajo carga constante y los obtenidos dinámicamente. El estudio bibliográfico de los antecedentes permitió suponer que en nuestro caso (una roca blanda) la divergencia entre ambos módulos sería relativamente alta (en rocas de gran dureza ambos módulos tienden a converger). Además se decidió qué variables y en qué modelos de correlación se investigaría según se explica en los apartados de Objetivos e Hipótesis. Los datos manejados proceden de probetas sometidas a distintos procesos térmicos en el trabajo anterior, con distintos grados de deterioro que abarcan módulos desde unos 5 MPa hasta los más altos alcanzados por esta roca, poco más de 30 MPa. Estos datos se representaron gráficamente y se obtuvo una matriz de correlación con los distintos modelos estudiados, que permitió seleccionar la ecuación que mejor predice los módulos estáticos a partir de los dinámicos. Como se ha dicho antes, esta línea de investigación surgió con la idea de establecer una base analítica/experimental para este tipo de roca, que permitiera la inspección del estado del material de una construcción por medio de ensayos no destructivos, para cuantificar su grado de deterioro.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3. Resultados

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3. Resultados

3.1. Ensayos previos

3.1.1. Mineralogía

Los componentes principales de la roca analizada son la calcita (70%), dolomita rica en hierro (25%), cuarzo (5%) y trazas de minerales de arcilla (illita). Desde un punto de vista petrográfico, la roca corresponde a una biocalcarenita muy porosa clasificada como *Grainstone* según Dunham (1962). Texturalmente, esta roca presenta aloquímicos abundantes, por lo general de menos de 2 mm de tamaño, aunque también se encuentran bandas de varios tamaños de grano. Dentro de la gran variedad de briozoos fósiles, foraminíferos, algas rojas y fragmentos de equinodermos (placas y radiolas) son los más abundantes. La fracción ortoquímica corresponde principalmente a esparita. Presenta una porosidad media-alta, principalmente tipo interpartícula. Además, también es posible apreciar una bioturbación elevada, con relleno de terrígenos (Sánchez, 2005). En la *Figura 10* se muestran los resultados del ensayo de difracción por rayos X.

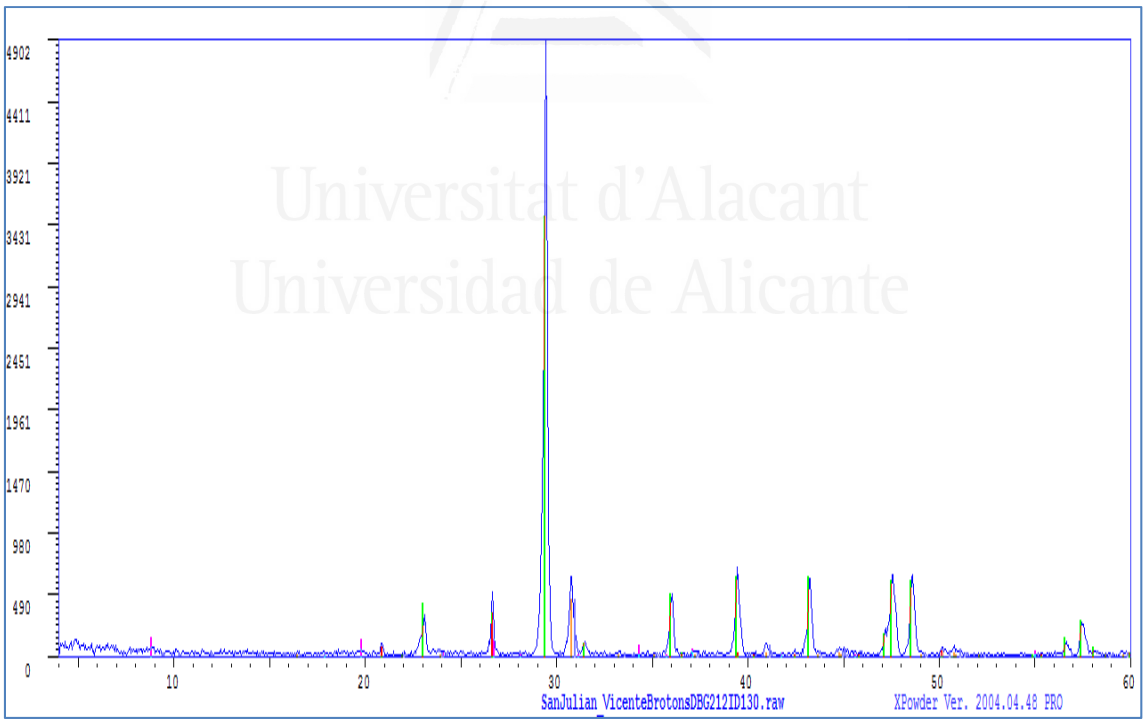


Figura 10- Calcita-verde; cuarzo-rojo, naranja-ankerita; azul-dolomita; morado-illita.

Es importante destacar el hecho de que la ankerita como tal ($FeCO_3$) no es habitual en este tipo de rocas. El pico analizado en este estudio se debe a que el hierro se

sustituye por el calcio en la estructura de la calcita y por el calcio y magnesio en la estructura de la dolomita. Es decir, en realidad, en esta biocalcarenita encontramos calcita y dolomita ricas en hierro, que por otra parte, junto con la presencia de óxidos de hierro, son la causa de su color ocre-anaranjado.

3.1.2. Porosidad y densidad

Los resultados de los ensayos han mostrado la alta porosidad, y la predominancia de la porosidad abierta, de la roca analizada. Los valores se muestran en la *Tabla 4* y la *Tabla 5*, separadas en los dos bloques de ensayos para fluencia y efecto del sometimiento a altas temperaturas.

Tabla 4 - *Porosidad y densidad de las muestras intactas. ϕ: diámetro, M_d: masa seca, M_h: masa sumergida, M_s: masa saturada, ρ_{bulk}: densidad aparente, n_0: porosidad abierta, n: porosidad total.*

	Altura mm	ϕ mm	M_d g	M_h g	M_s g	ρ_{bulk} g/cm^3	n_0 %	n %
1	100,53	54,23	489,96	310,12	530,14	2,22	18,26	18,38
2	100,62	54,25	511,53	323,47	558,42	2,17	19,96	20,22
3	100,41	54,10	499,54	315,75	544,96	2,18	19,82	19,85
4	100,93	54,20	496,71	314,20	544,83	2,15	20,86	20,96
5	101,63	54,17	493,54	311,86	544,80	2,12	22,01	22,06
6	101,40	54,14	496,51	313,92	544,82	2,15	20,92	20,96
7	100,46	54,12	499,13	315,40	546,17	2,16	20,38	20,59
8	100,80	54,20	500,43	316,36	547,11	2,16	20,23	20,59
9	101,50	54,12	518,32	327,68	559,79	2,23	17,87	18,01
10	101,00	54,22	514,65	325,42	556,60	2,22	18,15	18,38
					Media:	**2,18**	**19,85**	**20,00**
					Desv.:	0,03	1,29	1,27

Tabla 5 - Porosidad y densidad de las muestras intactas. ϕ: diámetro, Md: masa seca, Mh: masa sumergida, Ms: masa saturada, ρbulk: densidad aparente, n0: porosidad abierta, n: porosidad total.

	Altura mm	ϕ mm	Md g	Mh g	Ms g	ρ_{bulk} g/cm^3	n_0 %	n %
1A	126,70	52,00	575,12	360,26	629,24	2,13	20,12	20,89
1B	127,90	52,00	563,64	353,08	624,62	2,07	22,46	23,24
1C	126,67	52,00	547,35	341,25	610,17	2,03	23,36	25,69
1D	125,75	52,00	579,25	355,70	622,67	2,17	16,27	19,45
1E	127,80	52,00	577,32	361,73	633,06	2,12	20,54	21,90
2A	127,22	52,00	559,84	350,53	620,62	2,07	22,50	23,64
2B	128,20	52,00	552,93	345,34	617,51	2,03	23,73	25,18
2C	128,03	52,00	554,64	347,95	619,76	2,04	23,96	24,50
3A	127,73	52,00	560,84	352,34	623,51	2,06	23,11	23,69
3B	127,03	52,00	568,13	351,85	621,54	2,10	19,81	22,24
3C	127,10	52,00	591,96	370,39	640,23	2,19	17,89	18,49
4A	127,28	52,00	534,15	335,62	605,84	1,97	26,53	26,44
4B	127,40	52,00	600,71	375,76	646,23	2,22	16,83	19,27
4C	126,83	52,00	555,49	348,72	617,99	2,06	23,21	25,03
4D	121,40	52,00	547,56	343,82	601,56	2,12	20,95	22,17
4E	127,55	52,00	555,64	349,06	619,85	2,05	23,71	25,08
5A	127,13	52,00	592,08	364,26	634,16	2,19	15,59	19,23
5B	126,57	52,00	587,84	359,55	628,26	2,18	15,04	19,64
5C	126,00	52,00	541,99	339,85	607,36	2,02	24,43	24,89
6A	127,80	52,00	569,27	351,86	623,18	2,09	19,87	22,30
6B	127,03	52,00	614,18	381,87	651,57	2,27	13,86	16,31
6C	127,20	52,00	554,95	346,70	616,75	2,05	22,88	23,91
6D	127,27	52,00	557,20	350,03	620,22	2,06	23,32	23,68
6E	126,40	52,00	582,79	365,33	633,69	2,17	18,97	19,20
2A1	121,40	52,00	518,95	324,51	578,05	2,04	23,31	24,30
2A2	121,90	52,00	521,36	326,74	582,69	2,03	23,96	24,58
2A3	121,60	52,00	507,93	317,96	566,82	2,04	23,66	24,85
3A1	120,00	52,00	520,70	327,27	579,97	2,06	23,45	23,96
3A2	120,35	52,00	504,09	316,60	569,08	1,99	25,74	26,25
3A3	121,40	52,00	524,75	328,29	583,80	2,05	23,11	23,96
4A1	120,40	52,00	517,76	324,85	577,86	2,04	23,75	24,79
4A2	120,17	52,00	517,37	324,34	577,36	2,04	23,71	24,09
5A1	120,10	52,00	516,89	323,99	576,70	2,04	23,67	24,87
5A2	118,90	52,00	531,69	332,06	582,75	2,12	20,37	21,93
5A3	119,40	52,00	516,06	324,15	574,55	2,06	23,36	23,93
6A1	120,73	52,00	518,98	326,14	574,75	2,08	22,43	22,96
6A2	121,80	52,00	517,62	324,55	580,88	2,02	24,68	25,42
2W1	120,60	52,00	519,89	326,35	580,45	2,04	23,83	24,30
2W2	120,80	52,00	527,16	325,83	580,05	2,07	20,80	23,69
2W3	119,90	52,00	530,79	324,17	566,74	2,18	14,82	19,46
2W4	120,50	52,00	549,15	333,99	588,20	2,16	15,36	20,01

	Tabla 5 (Continuación)							
	Altura	ϕ	Md	Mh	Ms	ρ_{bulk}	n_0	n
	mm	mm	g	g	g	g/cm^3	%	%
3W1	122,26	52,00	565,85	345,26	602,78	2,19	14,34	18,92
3W2	122,10	52,00	550,84	335,59	587,73	2,18	14,63	19,20
3W3	107,20	52,00	490,71	298,44	524,93	2,16	15,11	20,15
3W4	121,73	52,00	553,76	336,90	593,03	2,16	15,33	20,88
4W1	120,60	52,00	554,42	337,76	592,21	2,18	14,85	20,03
4W2	120,30	52,00	551,74	335,96	589,64	2,17	14,94	20,24
4W3	121,93	52,00	560,46	340,75	597,03	2,18	14,27	19,59
5W1	122,60	52,00	566,29	344,11	602,66	2,19	14,07	19,85
5W2	122,10	52,00	561,86	341,31	599,53	2,17	14,59	19,58
5W3	122,20	52,00	552,60	337,17	590,21	2,18	14,86	19,62
5W4	120,03	52,00	555,62	339,41	592,46	2,19	14,56	18,97
6W1	120,00	52,00	547,99	333,45	587,12	2,16	15,43	20,34
6W2	123,20	52,00	565,60	344,63	603,68	2,18	14,70	19,39
6W3	122,00	52,00	568,39	346,33	603,90	2,20	13,79	18,92
					Media:	**2,11**	**19,72**	**22,09**
					Desv.:	0,07	4,08	2,53

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.1.3. Ultrasonidos

El estudio de propagación de ondas ultrasónicas arroja los resultados indicados en la *Tabla 6* y la *Tabla 7*, que contienen las muestras utilizadas para la fluencia y las altas temperaturas respectivamente. Se incluyen los parámetros básicos de atenuación espacial y velocidades de las ondas P y S, así como el cálculo de los módulos dinámicos a partir de las velocidades.

Tabla 6 - Ultrasonidos y módulos dinámicos. Ø: diámetro, V_p: velocidad de las ondas P, V_s: velocidad de las ondas S, Att: atenuación espacial, E_{dyn}: módulo de elasticidad dinámico, ν_{dyn}: coeficiente de Poisson dinámico.

	Altura mm	Ø mm	Vp km/s	Vs km/s	Att dB/cm	ρ_{bulk} g/cm^3	E_{dyn} GPa	ν_{dyn}
1	100,53	54,23	3,682	2,167	3,24	2,22	24,47	0,24
2	100,62	54,25	3,870	2,318	2,94	2,17	28,85	0,22
3	100,41	54,10	3,847	2,241	3,34	2,18	27,03	0,24
4	100,93	54,20	3,724	2,185	3,44	2,15	25,20	0,24
5	101,63	54,17	3,835	2,135	3,43	2,12	24,50	0,28
6	101,40	54,14	3,798	2,167	3,72	2,15	25,14	0,26
7	100,46	54,12	3,864	2,017	5,58	2,16	23,07	0,31
8	100,80	54,20	3,804	2,270	3,43	2,16	27,13	0,22
9	101,50	54,12	3,965	2,339	3,23	2,23	29,95	0,23
10	101,00	54,22	3,900	2,338	3,30	2,22	29,42	0,22
		Media:	**3,83**	**2,22**	**3,56**	**2,18**	**26,48**	**0,25**
		Desv.:	0,08	0,10	0,70	0,03	2,24	0,03

Universidad de Alicante

Tabla 7 - Ultrasonidos y módulos dinámicos. ϕ: diámetro, V_p: velocidad de las ondas P, V_s: velocidad de las ondas S, Att: atenuación espacial, E_{dyn}: módulo de elasticidad dinámico, ν_{dyn}: coeficiente de Poisson dinámico.

	Altura mm	ϕ mm	Vp km/s	Vs km/s	Att dB/cm	ρ_{bulk} g/cm^3	E_{dyn} GPa	ν_{dyn}
1A	126,70	52,00	4,11	2,28	3,90	2,13	28,34	0,28
1B	127,90	52,00	3,92	2,28	3,80	2,07	26,89	0,24
1C	126,67	52,00	3,79	2,20	3,90	2,03	24,50	0,25
1D	125,75	52,00	4,03	2,44	3,84	2,17	31,18	0,21
1E	127,80	52,00	3,78	2,47	4,25	2,12	29,20	0,13
2A	127,22	52,00	3,98	2,30	3,54	2,07	27,27	0,25
2B	128,20	52,00	3,84	2,16	3,94	2,03	23,97	0,27
2C*	128,03	52,00	3,90	2,23	4,00	2,04	25,49	0,26
3A	127,73	52,00	3,94	2,23	4,13	2,06	26,02	0,26
3B	127,03	52,00	3,83	2,18	3,34	2,10	25,22	0,26
3C*	127,10	52,00	4,07	2,27	4,00	2,19	28,76	0,27
4A	127,28	52,00	4,03	2,26	3,95	1,97	25,68	0,27
4B	127,40	52,00	4,39	2,48	3,54	2,22	34,50	0,27
4C*	126,83	52,00	3,80	2,21	4,57	2,06	25,02	0,24
4D	121,40	52,00	4,02	2,48	3,95	2,12	31,08	0,19
4E*	127,55	52,00	3,74	2,25	3,40	2,05	25,28	0,22
5A	127,13	52,00	4,13	2,37	3,50	2,19	30,88	0,25
5B	126,57	52,00	4,36	2,53	3,59	2,18	34,89	0,25
5C*	126,00	52,00	3,96	2,23	4,05	2,02	25,58	0,27
6A	127,80	52,00	3,80	2,23	4,67	2,09	25,86	0,24
6B	127,03	52,00	3,80	2,41	4,56	2,27	30,70	0,17
6C*	127,20	52,00	3,83	2,17	3,96	2,05	24,43	0,26
6D	127,27	52,00	3,71	2,24	4,14	2,06	25,07	0,21
6E*	126,40	52,00	3,97	2,47	3,87	2,17	31,34	0,19
2A1	121,40	52,00	3,61	2,08	3,65	2,04	22,12	0,25
2A2	121,90	52,00	3,61	2,05	4,33	2,03	21,59	0,26
2A3	121,60	52,00	3,92	2,08	3,95	2,04	23,03	0,30
3A1	120,00	52,00	3,87	2,20	4,96	2,06	25,08	0,26
3A2	120,35	52,00	3,65	2,11	4,25	1,99	22,18	0,25
3A3	121,40	52,00	3,99	2,13	4,12	2,05	24,20	0,30
4A1	120,40	52,00	3,91	2,14	3,86	2,04	24,10	0,29
4A2	120,17	52,00	3,83	2,17	3,98	2,04	24,27	0,26
5A1	120,10	52,00	3,82	2,05	3,76	2,04	22,27	0,30
5A2	118,90	52,00	3,81	2,23	2,91	2,12	26,05	0,24
5A3	119,40	52,00	3,98	2,21	4,14	2,06	25,68	0,28
6A1	120,73	52,00	3,97	2,19	3,88	2,08	25,57	0,28
6A2	121,80	52,00	4,03	2,24	3,99	2,02	25,81	0,28
2W1	120,60	52,00	4,13	2,26	3,69	2,04	26,81	0,29
2W2	120,80	52,00	3,64	2,14	3,85	2,07	23,45	0,23
2W3	119,90	52,00	4,28	2,50	3,56	2,18	33,86	0,24
2W4	120,50	52,00	4,04	2,37	2,95	2,16	30,03	0,24

Universidad de Alicante

Tabla 7 (Continuación)

	Altura mm	ϕ mm	Vp km/s	Vs km/s	Att dB/cm	ρ_{bulk} g/cm^3	E_{dyn} GPa	ν_{dyn}
3W1	122,26	52,00	4,08	2,35	3,96	2,19	30,33	0,25
3W2	122,10	52,00	4,36	2,50	2,88	2,18	34,26	0,25
3W3	107,20	52,00	4,06	2,36	3,11	2,16	30,01	0,24
3W4	121,73	52,00	3,95	2,34	3,12	2,16	29,09	0,23
4W1	120,60	52,00	4,02	2,40	2,73	2,18	30,69	0,22
4W2	120,30	52,00	4,01	2,44	2,81	2,17	31,10	0,21
4W3	121,93	52,00	3,98	2,34	3,03	2,18	29,50	0,24
5W1	122,60	52,00	4,06	2,32	2,67	2,19	29,63	0,26
5W2	122,10	52,00	4,07	2,38	2,72	2,17	30,60	0,24
5W3	122,20	52,00	4,07	2,36	3,00	2,18	30,27	0,25
5W4	120,03	52,00	4,06	2,34	3,55	2,19	30,09	0,25
6W1	120,00	52,00	3,92	2,33	3,66	2,16	28,66	0,23
6W2	123,20	52,00	4,00	2,35	3,20	2,18	29,78	0,24
6W3	122,00	52,00	4,24	2,51	2,89	2,20	34,13	0,23
		Media:	**3,96**	**2,29**	**3,70**	**2,11**	**27,66**	**0,25**
		Desv.:	0,18	0,13	0,53	0,07	3,50	0,03

3.1.4. Ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos previos se realizaron sobre 10 probetas en dos series distintas. La *Tabla 8* y la *Tabla 9* muestran los resultados de estas pruebas. Como información adicional se incluyen los módulos dinámicos obtenidos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Tabla 8 - Ensayos mecánicos previos. E_{dyn} , E_{st}: módulos de elasticidad dinámico y estático; ν_{dyn} , ν_{st}: coeficientes de Poisson dinámico y estático; UCS: resistencia a compresión uniaxial.

	Módulo elástico		Coeficiente de Poisson		Resistencia
	Dinámico E_{dyn} GPa	Estático E_{st} GPa	Dinámico ν_{dyn}	Estático ν_{st}	comp. uni. UCS MPa
6	25,14	21,14	0,26	0,25	39,75
7	23,07	19,15	0,31	0,22	32,90
8	27,13	20,91	0,22	0,27	40,19
9	29,95	20,48	0,23	0,31	38,90
10	29,42	19,00	0,22	0,24	37,64
Media:	**26,94**	**20,13**	**0,25**	**0,26**	**37,88**
Desv.:	2,59	0,89	0,03	0,03	2,64

Tabla 9 - Ensayos mecánicos previos. E_{dyn} , E_{st}: módulos de elasticidad dinámico y estático; ν_{dyn} , ν_{st}: coeficientes de Poisson dinámico y estático; UCS: resistencia a compresión uniaxial.

	Módulo elástico		Coeficiente de Poisson		Resistencia
	Dinámico E_{dyn} GPa	Estático E_{st} GPa	Dinámico ν_{dyn}	Estático ν_{st}	comp. uni. UCS MPa
1A	28,34	22,25	0,28	0,23	36,37
1B	26,89	23,26	0,24	0,37	24,62
1C	24,50	17,90	0,25	0,39	27,45
1D	31,18	20,28	0,21	0,37	28,27
1E	29,20	24,19	0,13	0,20	40,58
Media:	**28,02**	**21,58**	**0,22**	**0,31**	**31,46**
Desv.:	2,24	2,25	0,05	0,08	6,01

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.2. Ensayos específicos

3.2.1. Fluencia

Los ensayos de fluencia realizados han dado los resultados que se muestran en la *Figura 11*. Durante las 96 horas de recogida de datos la deformación unitaria registrada ha seguido un patrón en principio esperable, con velocidades iniciales altas seguidas de una reducción típica de un modelo exponencial negativo. Ya se ha comentado la dificultad de realización de estos ensayos debido a la magnitud de la variable a medir, en comparación con el ruido de fondo debido a variaciones térmicas, fluctuaciones en la red de suministro de energía y señales parásitas inducidas por radiofrecuencia. No obstante, la temperatura ha sido controlada de la manera que se explica en el apartado de metodología, y los saltos bruscos debidos a las diferentes señales parásitas se han filtrado para obtener las curvas finales.

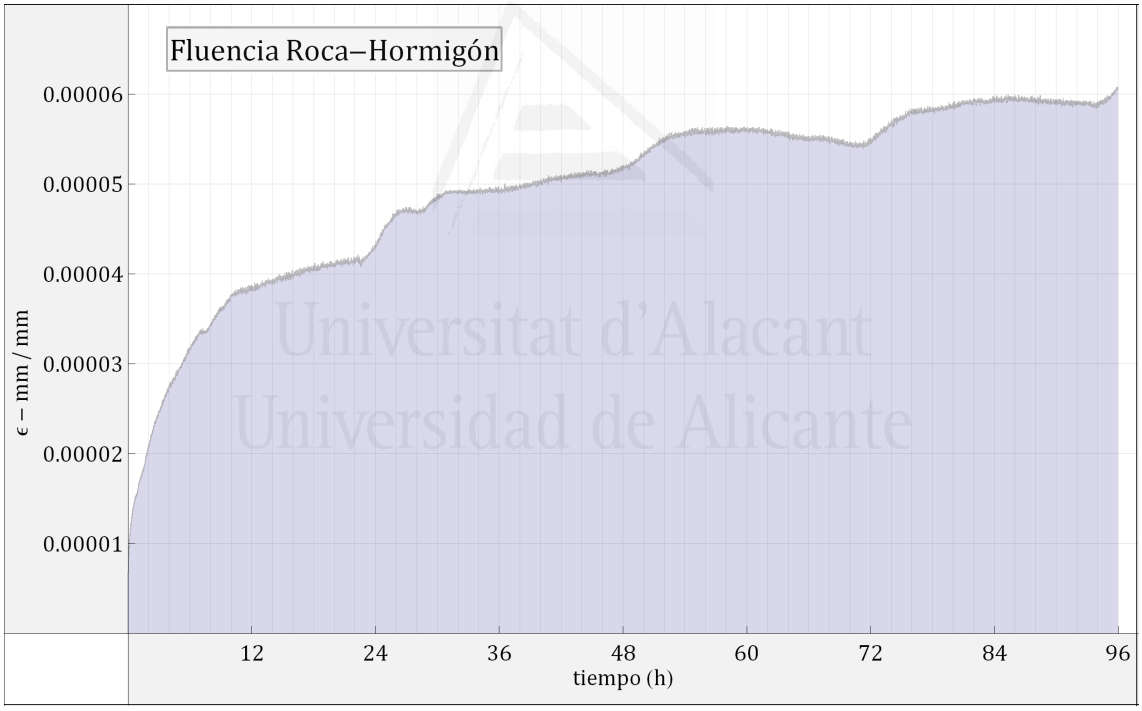


Figura 11- Deformación unitaria en el tiempo de la Piedra de San Julián.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.2.2. Sometimiento a altas temperaturas

3.2.2.1. Porosidad

La porosidad es uno de las propiedades más importantes en cuanto a su influencia en las propiedades mecánicas. Determina la capacidad de absorción de agua y en consecuencia, la sensibilidad a distintas formas de deterioro (heladicidad, eflorescencias, penetración de agentes químicos agresivos). La porosidad abierta media obtenida en este trabajo para 55 muestras intactas ha sido de 19.7±4.1%, que representa cerca del 90% de la porosidad total (22.1±2.5%). La *Figura 12* muestra un incremento porcentual de la porosidad frente al incremento de la temperatura alcanzada por la muestra en el proceso térmico previo. Las muestras enfriadas con agua muestran una amplia dispersión, así como moderados incrementos, en el rango de altas temperaturas. Las enfriadas al aire incrementan moderadamente la porosidad hasta los 300 ^{0}C y luego aumentan más rápidamente, hasta llegar al 14% de incremento (porosidad abierta a 600 ^{0}C). Estos resultados indican que hasta los 300 ^{0}C no se producen cambios estructurales significativos, y los que se producen están probablemente limitados a la ampliación de las micro-fisuras existentes sin crear nuevas conexiones entre los poros.

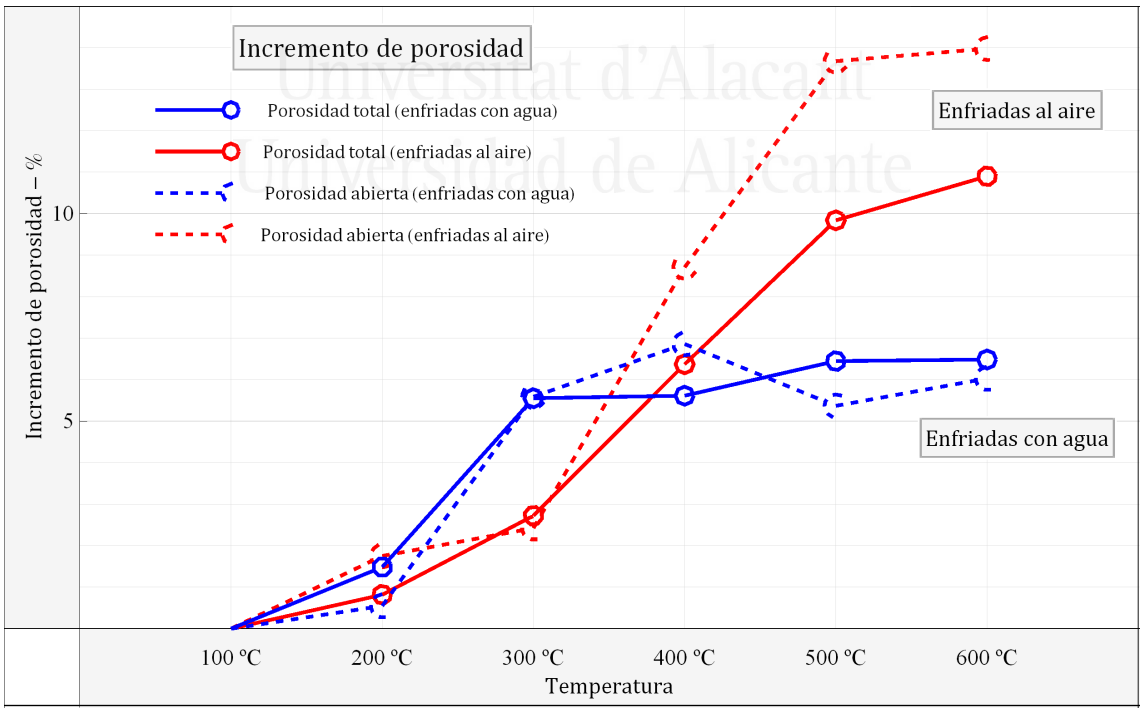


Figura 12- Incremento de la porosidad.

3.2.2.2. Ultrasonidos

Para cada una de las muestras analizadas en este ensayo se han obtenido tres parámetros ultrasónicos: velocidad de las ondas longitudinales (P) V_p, velocidad de las ondas transversales (S) V_s, y atenuación espacial o pérdida de energía de la onda durante su propagación. Los dos primeros sirven para el cálculo de los módulos dinámicos que se discutirán en el apartado correspondiente. Aquí nos limitamos a señalar que los valores obtenidos para las ondas P (V_p=3.96±0.18 km/s) y para las ondas S (V_s=2.29±0.13 km/s) corresponden a una roca con velocidad de propagación de ondas elásticas "Media" siguiendo la clasificación propuesta por la *International Association of Engineering Geology* (Anon, 1979). La atenuación espacial obtenida se muestra en la *Figura 13* antes y después del tratamiento térmico. Los incrementos detectados con la temperatura de ensayo están muy poco definidos en cuanto a su tendencia, obviamente no lineal. No se han encontrado diferencias concluyentes entre los métodos de enfriamiento. El incremento a la máxima temperatura puede llegar al 40%. Hay que señalar que la obtención de este parámetro es dificultosa incluso en condiciones de laboratorio, dependiendo de variables que no se pueden controlar con facilidad: duración de la medida y cantidad de gel de acoplamiento entre transductor y material (que depende a su vez de la primera) fundamentalmente.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

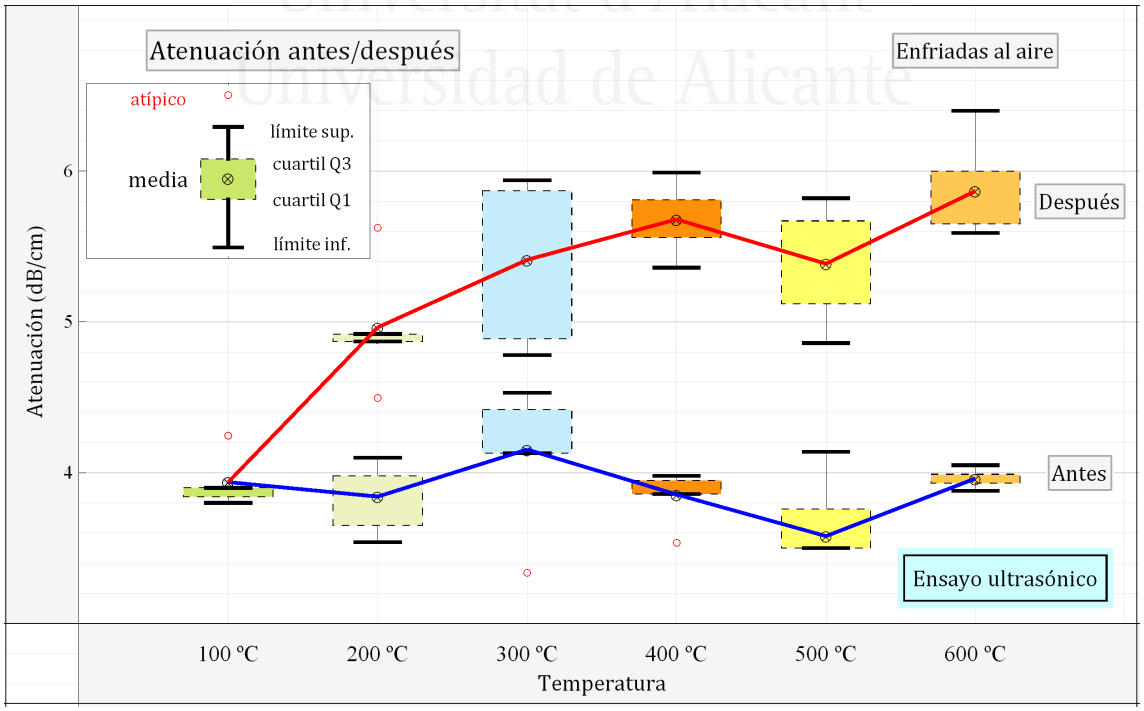


Figura 13- Atenuación espacial de la onda ultrasónica.

3.2.2.3. Constantes elásticas

Para la determinación de las constantes elásticas (módulo de Young y Coeficiente de Poisson) se han utilizado dos métodos: ensayos de propagación de ondas de presión en el material (medio elástico) y ensayos mecánicos. La *Figura 14* representa los resultados obtenidos mediante las velocidades de propagación de la onda ultrasónica para el módulo elástico. Hay que resaltar que este valor desciende de manera muy acusada con el incremento de temperatura.

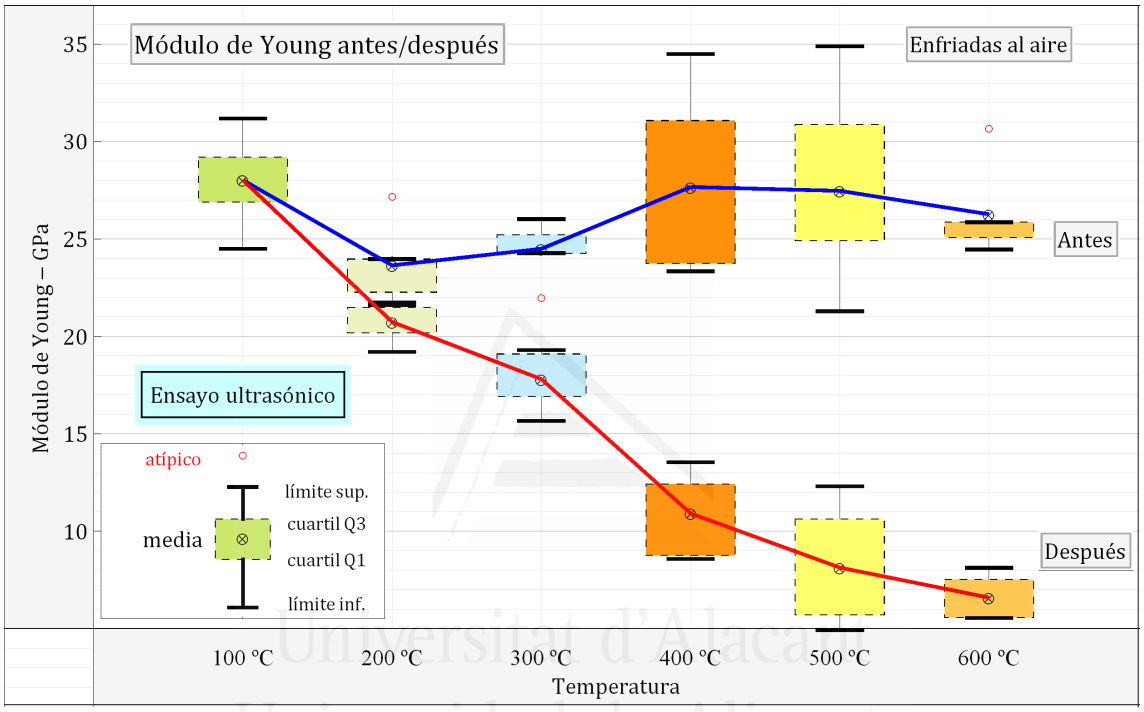


Figura 14- Módulo elástico antes/después (Ensayo ultrasónico).

En la *Figura 15* se representa esta tendencia que, como se ve, es aproximadamente lineal, y muestra que en los ejemplares enfriados con agua el descenso es algo mayor que en los enfriados al aire (a temperatura ambiente). No obstante, los resultados muestran tendencias muy similares en ambos métodos de enfriamiento. La caída del módulo elástico en las muestras enfriadas con agua es del orden del doble que la obtenida en las enfriadas al aire a 200 ^{0}C (≈20% contra ≈10%). Estas diferencias se ven gradualmente reducidas a medida que se incrementa la temperatura, de manera que a 600 ^{0}C se alcanzan resultados del 75% y del 78% para las enfriadas al aire y con agua respectivamente.

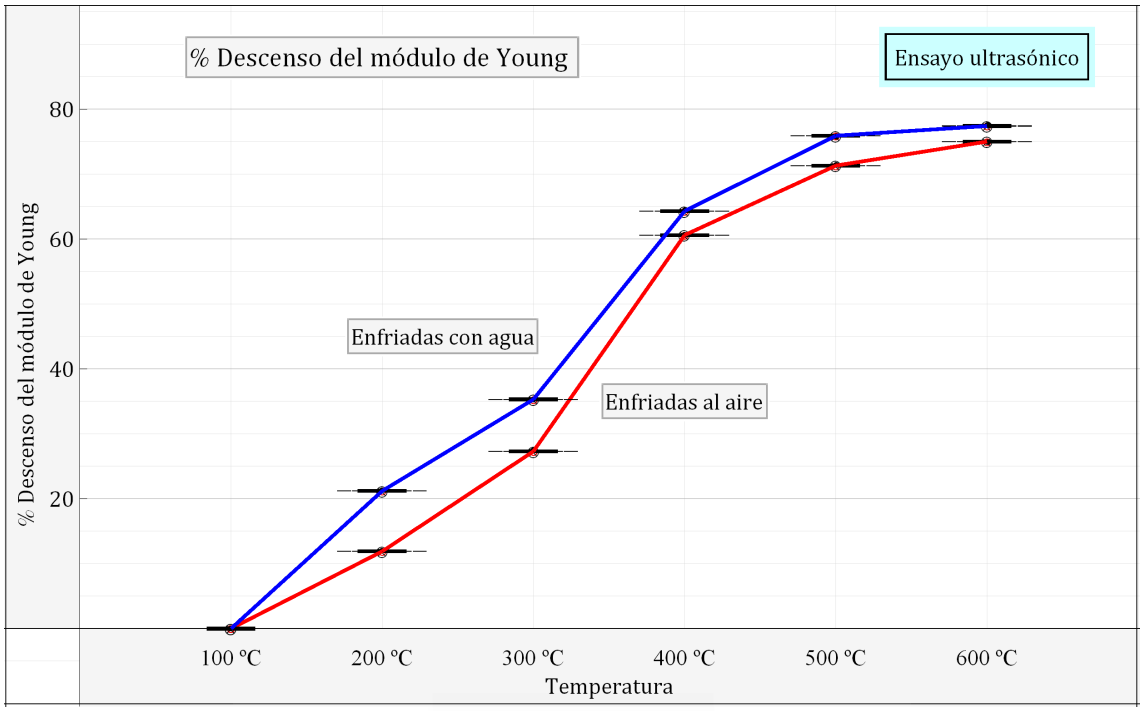


Figura 15- Descenso del módulo elástico (Ensayo ultrasónico).

En cuanto a los ensayos mecánicos, por su carácter destructivo, los parámetros obtenidos después de los procesos térmicos a cada temperatura han sido comparados con los valores de referencia correspondientes a las probetas calentadas a 105 ^{0}C. En la *Figura 16* se observa la gran reducción del módulo para las diferentes temperaturas de ensayo. Los valores absolutos obtenidos con el método estático son inferiores a los obtenidos dinámicamente (como se esperaba), aunque las tendencias marcadas por ambos métodos de medida son altamente similares.

El módulo estático desciende aproximadamente el 30% en las muestras enfriadas al aire y un 58% en las enfriadas con agua para bajas temperaturas de tratamiento (200 ^{0}C). Estos valores son mucho mayores que los detectados con el método dinámico, y van en el sentido de confirmar que estas temperaturas tan sólo extienden las micro-fisuras sin ampliar su tamaño, ni crear nuevos poros, lo que es menos detectable por medios ultrasónicos que por métodos estáticos. A la temperatura máxima los descensos con ambos métodos de enfriamiento superan el 85%, lo que se acerca bastante a lo detectado ultrasónicamente, máxime teniendo en cuenta que en igualdad de condiciones estos últimos dan valores más altos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

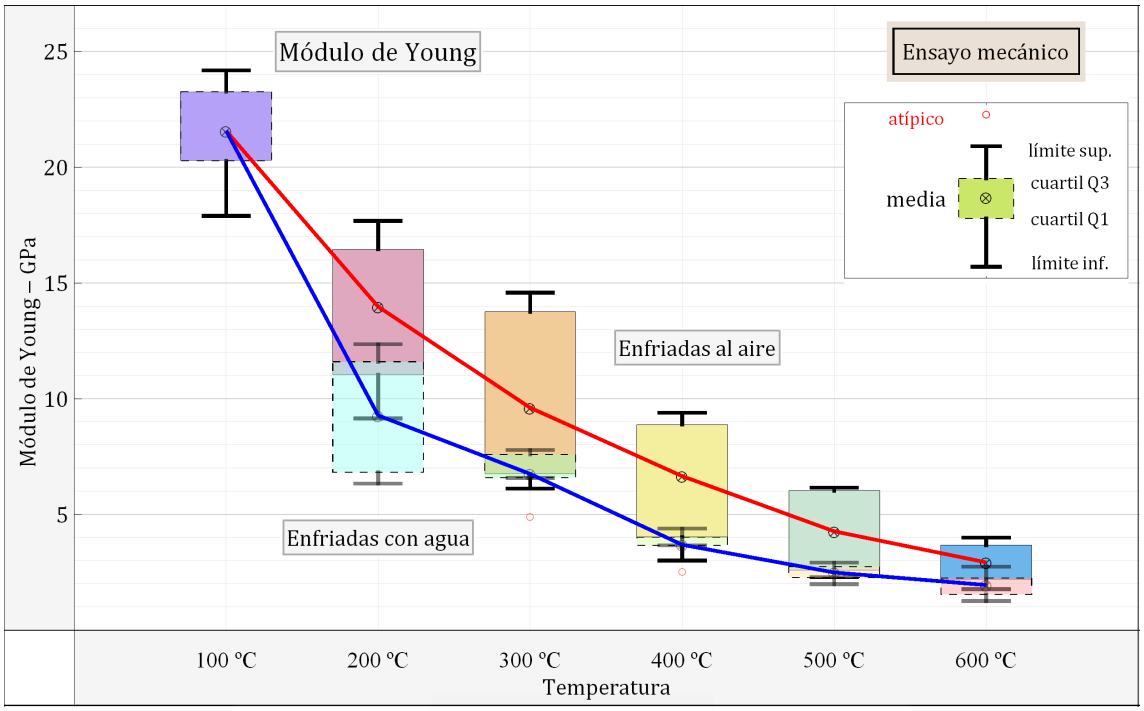


Figura 16- Módulo elástico después (Ensayo mecánico).

Los valores obtenidos del coeficiente de Poisson obtenido por ultrasonidos se incluyen en la *Figura 17*.

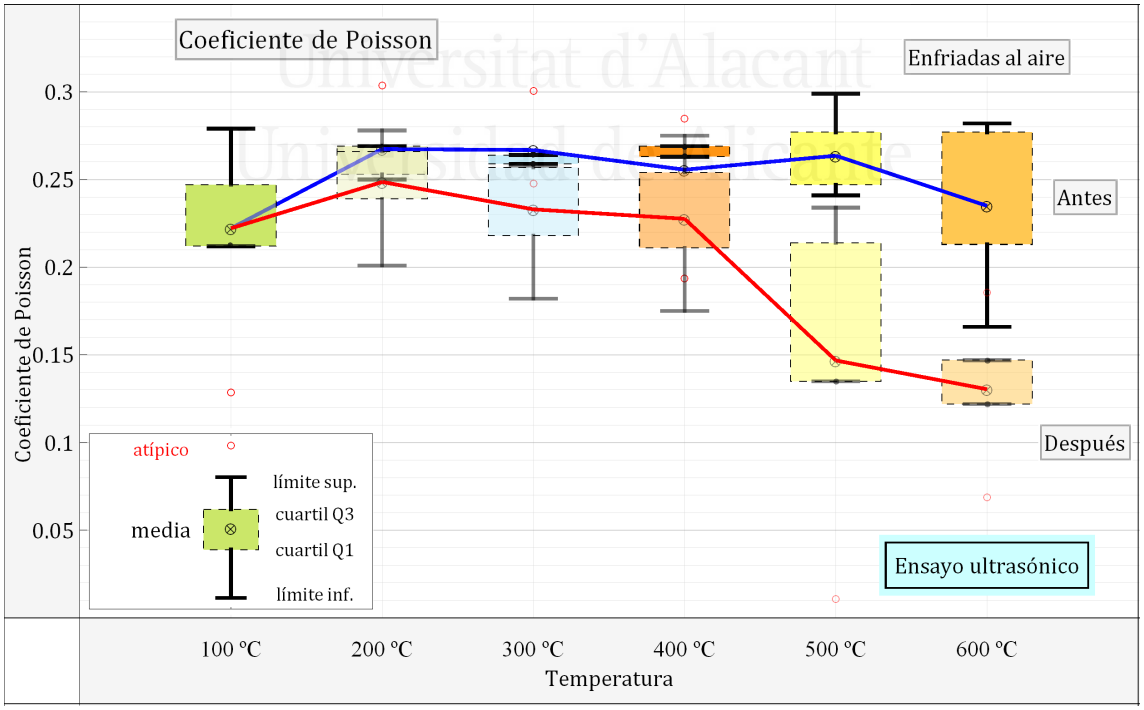


Figura 17- Coeficiente de Poisson antes/después (Ensayo ultrasónico).

Éstos también decrecen con el aumento de la temperatura. Como en el caso de los módulos, el descenso es mayor en las muestras enfriadas con agua. Los descensos se acusan marcadamente a partir de 400 ºC, llegando al 40% en las enfriadas al aire, y al 68% en las enfriadas con agua (*Figura 18*).

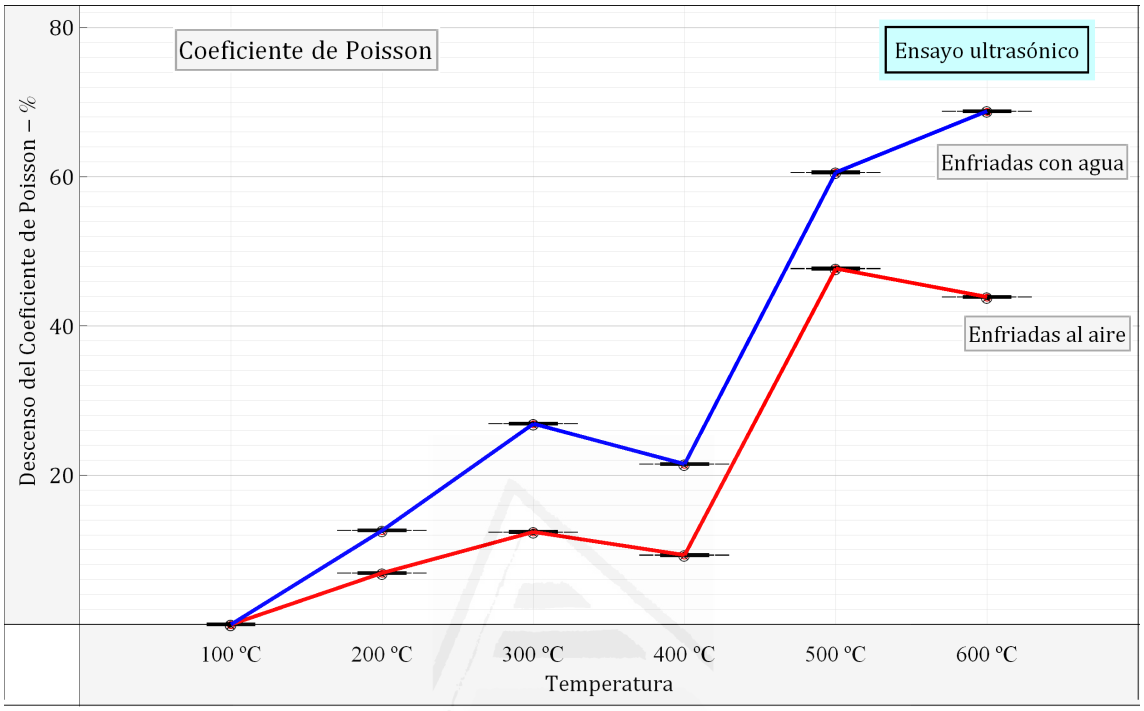


Figura 18- Descensos del Coeficiente de Poisson (Ensayo ultrasónico).

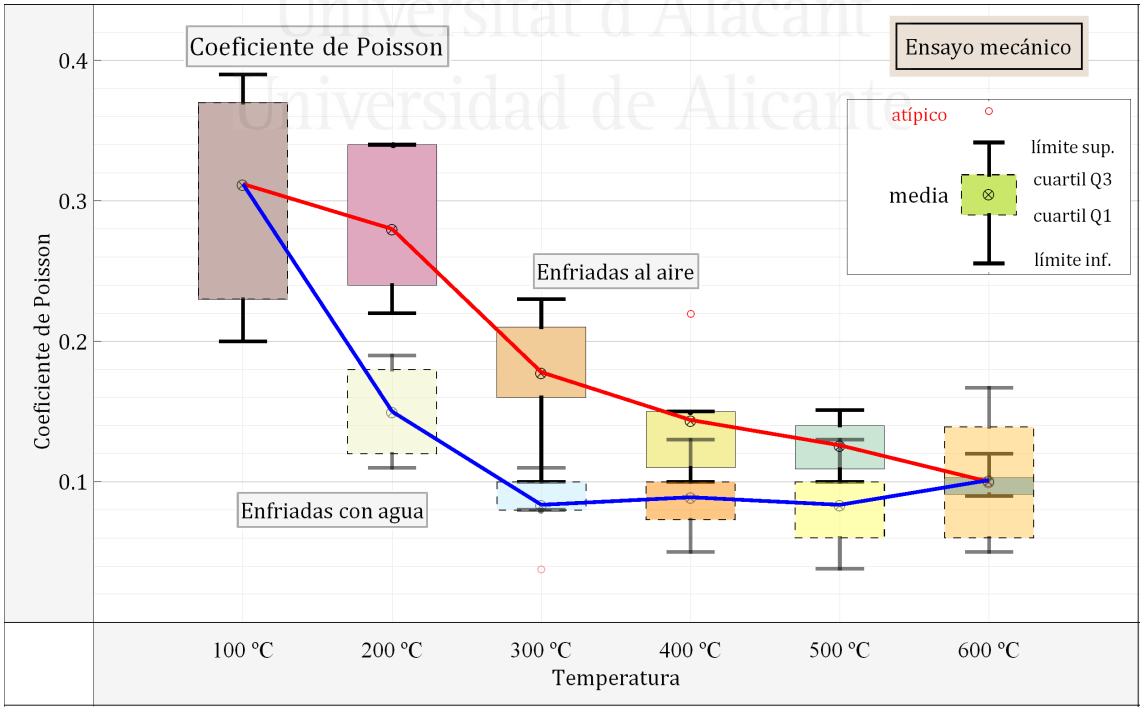


Figura 19- Coeficiente de Poisson antes/después (Ensayo mecánico).

Los ensayos mecánicos indican un comportamiento similar. Pueden verse los valores obtenidos en la *Figura 19*. Las pérdidas pueden llegar al 70% de los valores obtenidos con el material intacto.

3.2.2.4. Resistencia a compresión uniaxial (UCS)

La resistencia a compresión uniaxial (UCS) obtenida en los ensayos mecánicos, con ambos métodos de enfriamiento, se indica en la *Figura 20*.

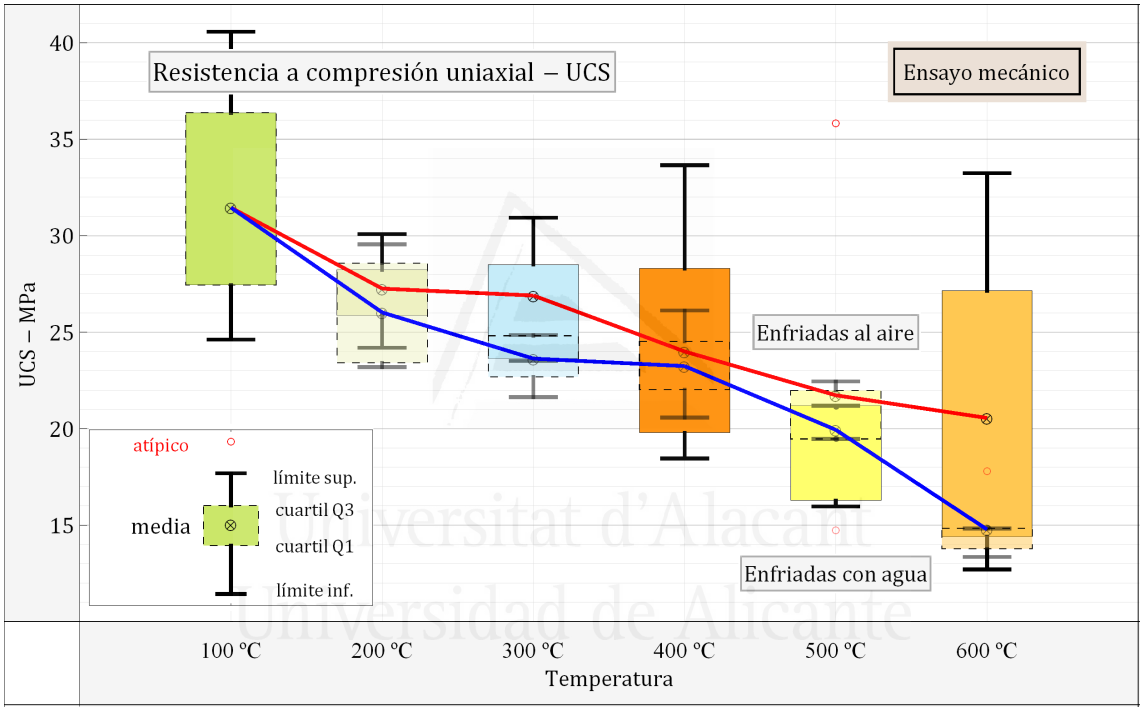


Figura 20- Resistencia a compresión uniaxial antes/después (Ensayo mecánico).

Los descensos alcanzan valores del 34% en las muestras enfriadas al aire, y del 53% en las enfriadas con agua, ambas a la máxima temperatura ensayada (600 ^{0}C) (*Figura 21*).

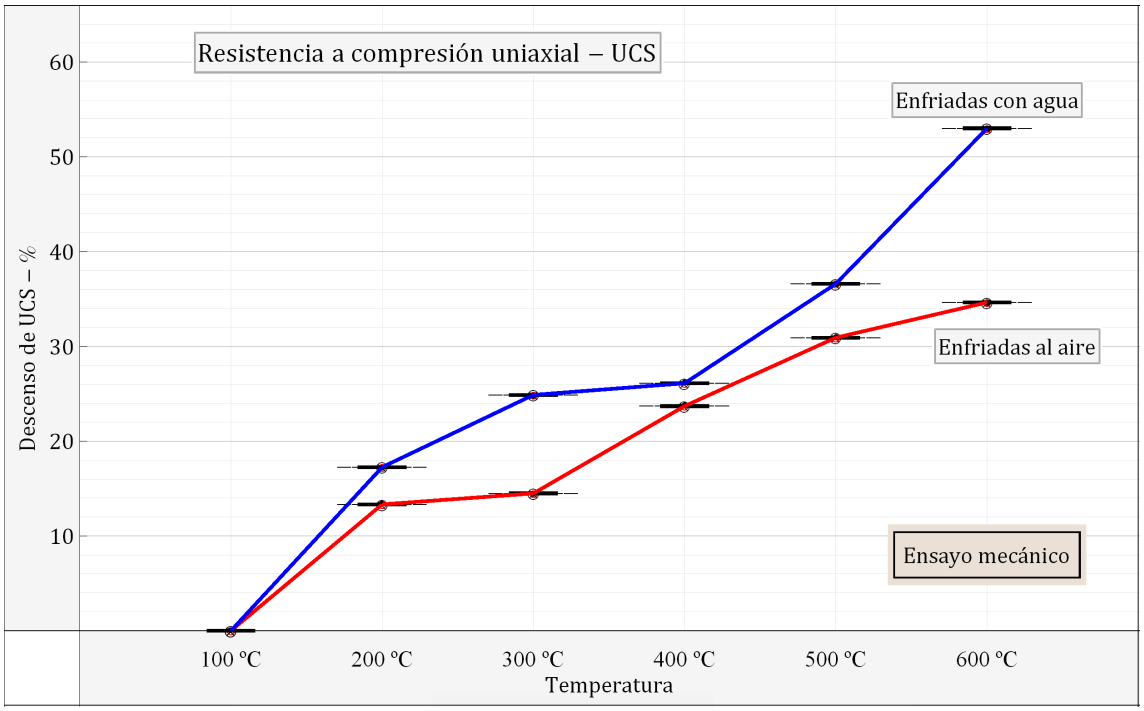


Figura 21- Descenso de la resistencia a compresión uniaxial (Ensayo mecánico).

3.2.2.5. Durabilidad por SDT

Estos ensayos se realizaron para analizar la influencia del calentamiento sobre el índice de Sehudes obtenido mediante el *Slake Durability Test*. Los resultados de la *Tabla 10* se han agrupado por bloques de temperatura en los que se marca la media de los índices obtenidos con las probetas de cada bloque.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Tabla 10 - Índices de Sehudes obtenidos mediante el ensayo SDT (Slake Durability Test). I_{di}: índice de Sehudes después de i ciclos.

Temp (ºC)	I_{d1}	I_{d2}	I_{d3}	I_{d4}	I_{d5}
105	99,09	98,25	97,29	96,44	95,68
200	99,10	97,96	97,04	96,29	95,70
300	99,06	98,12	97,37	96,56	95,74
400	99,03	97,80	96,90	96,04	95,17
500	99,02	97,88	97,01	96,10	95,23
600	98,89	97,86	96,76	95,93	95,16

Este ensayo determina la resistencia del material ante el debilitamiento y la desintegración producidos por ciclos de desgaste normalizados. Las rocas se clasifican por su resistencia al desgaste de acuerdo a sus índices después de uno (I_{d1})

y dos ciclos (I_{d2}). La durabilidad de la roca estudiada no se ve prácticamente afectada por los procesos térmicos a los que se ha sometido. La pérdida de durabilidad después de un ciclo es de 0.87% (I_{d1}=99.13) en la roca intacta, y de 1.02% (I_{d1}=98.98) en las muestras calentadas a 600 ^{0}C. Después de dos ciclos las pérdidas en la roca intacta y la calentada a 600 ^{0}C son de 1.46% (I_{d2}=98.54) y 1.96% (I_{d2}=98.04) respectivamente, diferencia demasiado pequeña para ser considerada estadísticamente significa. En la *Figura 22* se pueden observar los resultados de hasta cinco ciclos para cada temperatura, donde se demuestra la poca influencia de ésta en la durabilidad.

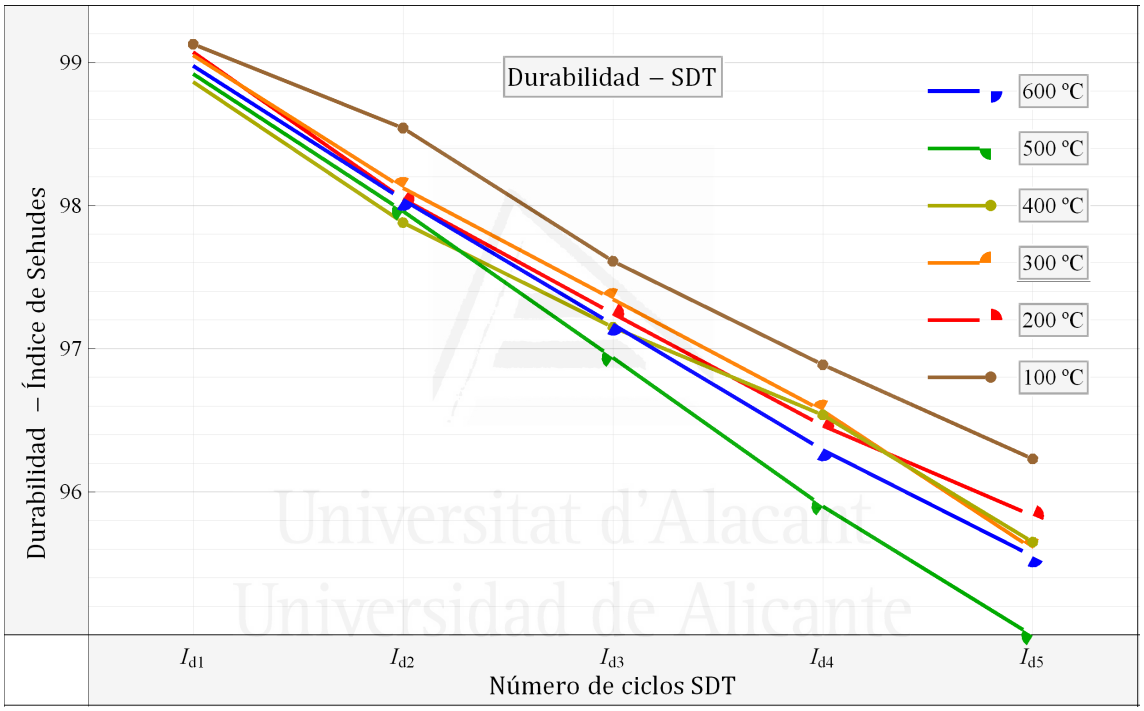


Figura 22- Durabilidad antes/después (Ensayo mecánico).

3.2.3. Relación entre módulos estáticos y dinámicos

La *Figura 23* representa las velocidades de las ondas P y S contra la temperatura alcanzada en el proceso de calentamiento de las muestras.

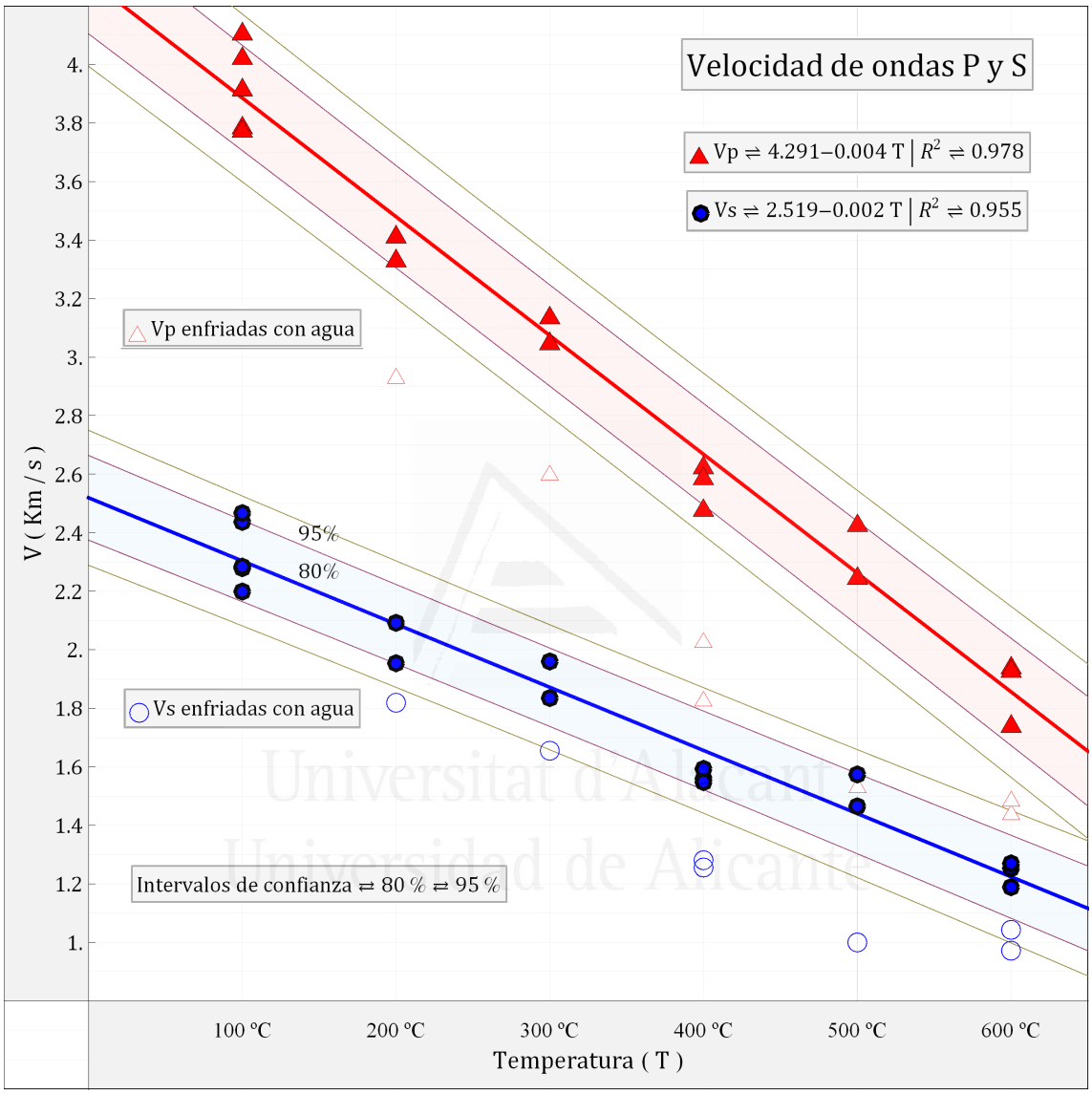


Figura 23- Velocidad de las ondas P y S, y correlación para las muestras enfriadas en seco. Los círculos corresponden a los valores de las muestras enfriadas con agua.

Como se puede observar, existe una tendencia lineal inversa de ambas velocidades (V_p y V_s) con el incremento de la temperatura, con un alto coeficiente de determinación R^2, según la *Ecuación 11* y la *Ecuación 12*.

$$V_p = 4.291 - 0.004\,T$$

Ecuación 11

$$V_s = 2.519 - 0.002\,T$$

Ecuación 12

Las muestras enfriadas con agua muestran una velocidad de propagación menor a igualdad de temperatura a causa de que el rápido enfriamiento por agua induce un mayor grado de deterioro. Este debilitamiento y su efecto en la velocidad de propagación de las ondas, es típicamente debido a la fisuración de los micro-cristales de calcita.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4. Análisis global y discusión de los resultados

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4. Análisis global y discusión de los resultados

4.1. Fluencia

Los resultados obtenidos muestran la validez de las hipótesis de partida en cuanto al establecimiento de una comparación con los modelos para hormigón, y el establecimiento de un modelo reológico. La función de fluencia (ϕ) definida en el código (FIB, 2010), una vez sintetizada la información contenida en sus diversas secciones, puede ser escrita como en la *Ecuación 13*.

$$\phi(t,t_0,RH,h)=\left(1+\frac{1-\frac{RH}{100}}{0.1+h^{\frac{1}{3}}}\left(\frac{35}{f28}\right)^{0.7}\right)\left(\frac{35}{f28}\right)^{0.2}\left(\frac{16.8}{f28^{\frac{1}{2}}}\right)\frac{1}{0.1+t_0{}^{0.2}}\times$$

$$\times\left(\frac{t-t_0}{1.5h\left(1+\left(\frac{1.2RH}{100}\right)^{18}\right)+250\left(\frac{35}{f28}\right)^{0.5}+(t-t_0)}\right)^{0.3}$$

Ecuación 13

Donde:

- t_0 es la edad a la carga
- RH/100 es la humedad relativa ambiental en % (100% si el hormigón no puede intercambiar humedad con el medio)
- h es el factor de forma-dimensiones en mm (2 x Área / Perímetro)
- f28 es la Resistencia a compresión uniaxial a 28 días

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

De esta forma, la fluencia (ε) viene dada por la *Ecuación 14*.

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma_{t_0}}{E_{28}}\,\phi(t,t_0,RH,h)$$

Ecuación 14

Donde:

- σ_{t_0} es la tensión constante aplicada
- E_{28} es el modulo de Young a los 28 días.

Con el fin de aplicar el modelo a un material rocoso se consideró t_0 =10000 días. De ese modo la roca se asemeja a un hormigón muy antiguo, en el que las

características mecánicas no varían con el tiempo en ausencia de otras variables. La elección de 10000 días es arbitraria, aunque se asume que a esta edad el hormigón considerado ha alcanzado el 98,9% de su resistencia a compresión y el 99,5% del módulo de elasticidad, con respecto a los máximos esperables según los modelos contemplados en el código FIB (2010).

Tabla 11 - Características del hormigón de referencia H01

Resistencia a compresión uniaxial-28 días	**35 MPa**
Resistencia a compresión uniaxial-10.000 días (CEB)	42 MPa
Módulo de Young-28 días (CEB)	29.38 GPa
Módulo de Young-10.000 días (CEB)	32.30 GPa
Cemento 52,5 R	S=0,20
Árido calizo	a=0,9

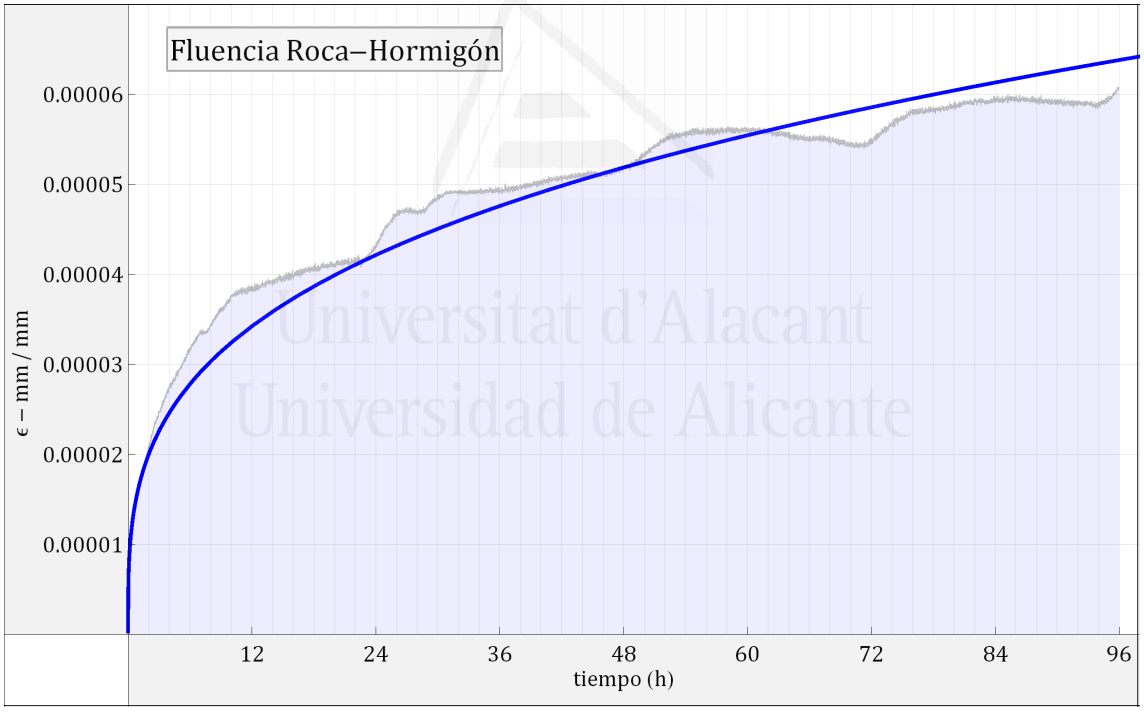


Figura 24- Curva de fluencia del hormigón H01 (azul) y la roca ensayada (gris).

Para la aplicación del modelo se ha seleccionado un hormigón con una resistencia a compresión uniaxial similar a la de la roca (hormigón tipo H01). Sus características se resumen en la *Tabla 11*. Estas características se han obtenido usando un ajuste por mínimos cuadrados, de modo que la fluencia del hormigón a

lo largo de las primeras 96 horas, de acuerdo con el modelo, se adaptara a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio con la roca estudiada.

La *Figura 24* muestra la deformación por fluencia del hormigón H01 previamente definido (azul) y los datos obtenidos de la prueba de la roca (área gris). Se puede observar la tendencia convergente entre ambas curvas, lo que indica, teniendo en cuenta las hipótesis y consideraciones anteriores, que reflejan fenómenos muy relacionados. El coeficiente de determinación (R^2) para la correlación entre los datos obtenidos para la roca y la discretización de la función de fluencia (FIB, 2010) (*Ecuación 14*) para el hormigón H01 es de 0.9925.

También se ha utilizado en este trabajo un modelo reológico de cuatro celdas de Kelvin, con el fin de reproducir el comportamiento en fluencia de la roca estudiada. Este modelo reológico se ha ajustado a los parámetros del modelo FIB (2010) a fin de reproducir el comportamiento de la función previamente definida (*Ecuación 14*) durante un periodo de carga de 10000 días de la siguiente forma: En primer lugar la *Ecuación 14* de fluencia se ha discretizado con el fin de tratarla como una tabla de datos tiempo-deformación, en segundo lugar se ha ajustado por mínimos cuadrados la función que representa el comportamiento del modelo reológico (*Ecuación 15*) a estos datos, y como consecuencia de ello se han obtenido los parámetros del modelo (E_i y η_i).

La *Figura 25* muestra el modelo propuesto. Las celdas de Maxwell, que describen la fase viscoplástica, no se han considerado porque en este trabajo -y en FIB (2010)- sólo se estudia la componente de fluencia primaria o viscoelástica de la deformación (la función hiperbólica de fluencia dada en el código modelo tiende asintóticamente a un máximo a tiempo infinito lo que indica que estamos en fluencia primaria, con deformaciones a velocidad continuamente decreciente. Los ensayos de compresión y fluencia que hemos realizado, mantienen las tensiones en el rango elástico del material en todo momento).

La elección del número de celdas en el modelo de Kelvin está determinada por la precisión requerida para el ajuste FIB/Modelo reológico. En este caso, el coeficiente de determinación (R^2) es de 0.99. Para reproducir estas deformaciones a lo largo del tiempo con la precisión requerida, se ha utilizado un modelo reológico clásico (resortes y amortiguadores), compuesto por cuatro celdas de Kelvin (1 a 4 *en la Figura 25 y en la Ecuación 15*). Los parámetros de ajuste para el modelo reológico se muestran en la *Tabla 12*.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

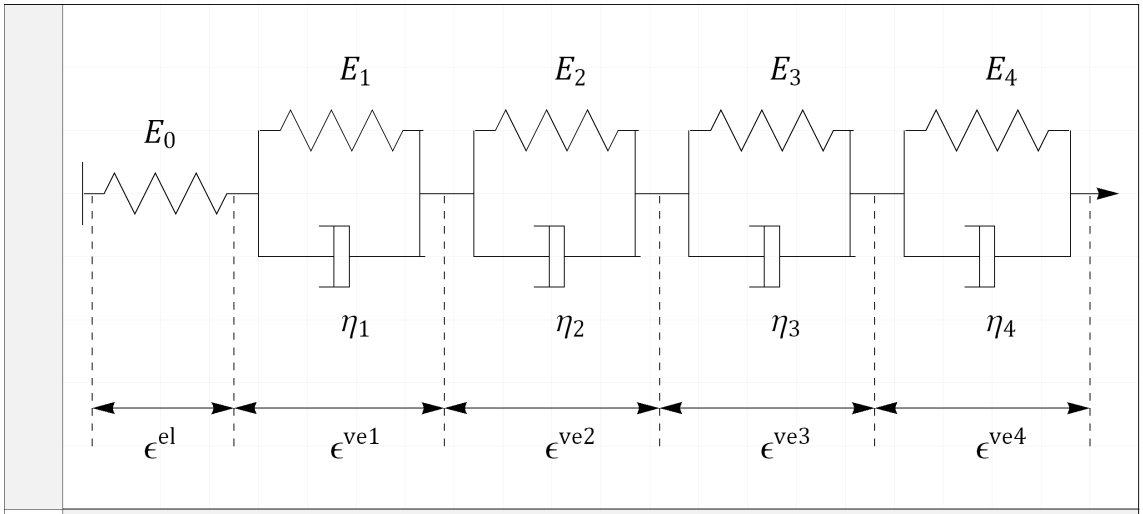


Figura 25- Modelo reológico propuesto. E_i: rigideces de los resortes; η_i: viscosidades de los amortiguadores.

La deformación unitaria (ε) del modelo anterior se obtiene de la *Ecuación 15*:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_{t0}}{E_0} + \frac{\sigma_{t0}}{E_1}\left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1}t}\right) + \frac{\sigma_{t0}}{E_2}\left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2}t}\right) + \frac{\sigma_{t0}}{E_3}\left(1 - e^{-\frac{E_3}{\eta_3}t}\right) + \frac{\sigma_{t0}}{E_4}\left(1 - e^{-\frac{E_4}{\eta_4}t}\right)$$

Ecuación 15

Donde:

- σ_{t0} es la tensión constante aplicada
- E_i son los módulos de Young de los diferentes resortes del modelo
- η_i son las viscosidades de los diferentes amortiguadores del modelo

Tabla 12 - Parámetros del modelo reológico (Ecuación 15)

Parámetro	Valor (GPa)	Parámetro	Valor (GPa.s)
E0	1.0032E+03	-	-
E1	8.2256E+02	η1	1.3531E+02
E2	2.6989E+02	η2	2.1276E+03
E3	1.4497E+02	η3	3.5180E+03
E4	2.3768E+02	η4	6.2413E+05

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Considerando los resultados obtenidos, se ha propuesto una ecuación simplificada (*Ecuación 16*), adaptada de la *Ecuación 14*, para estimar el comportamiento en fluencia (ε) de esta roca:

$$\varepsilon(t,h) = \frac{\sigma_{t0}}{E_r}\left(\frac{1}{q_u}\right)^{0.7}\left(\frac{519.615\,t}{t + 1707.825\left(\frac{1}{q_u}\right)^{0.5} + 41.435\,h}\right)^{0.3}$$

Ecuación 16

Donde:

- σ_{t0} es la tensión constante aplicada (MPa)
- E_r es el módulo de Young de la roca (MPa)
- h es el factor de forma-dimensiones en mm (2 x Área / Perímetro)
- $q_u$es la Resistencia a compresión uniaxial de la roca (MPa)

La *Figura 26* muestra el modelo FIB (2010) ajustado a los datos observados (azul) y la deformación calculada de acuerdo con la *Ecuación 16* para los valores de q_u=37 MPa y E_r=25 GPa, que corresponden a una roca con características mecánicas similares a la estudiada, para un período de 4 días.

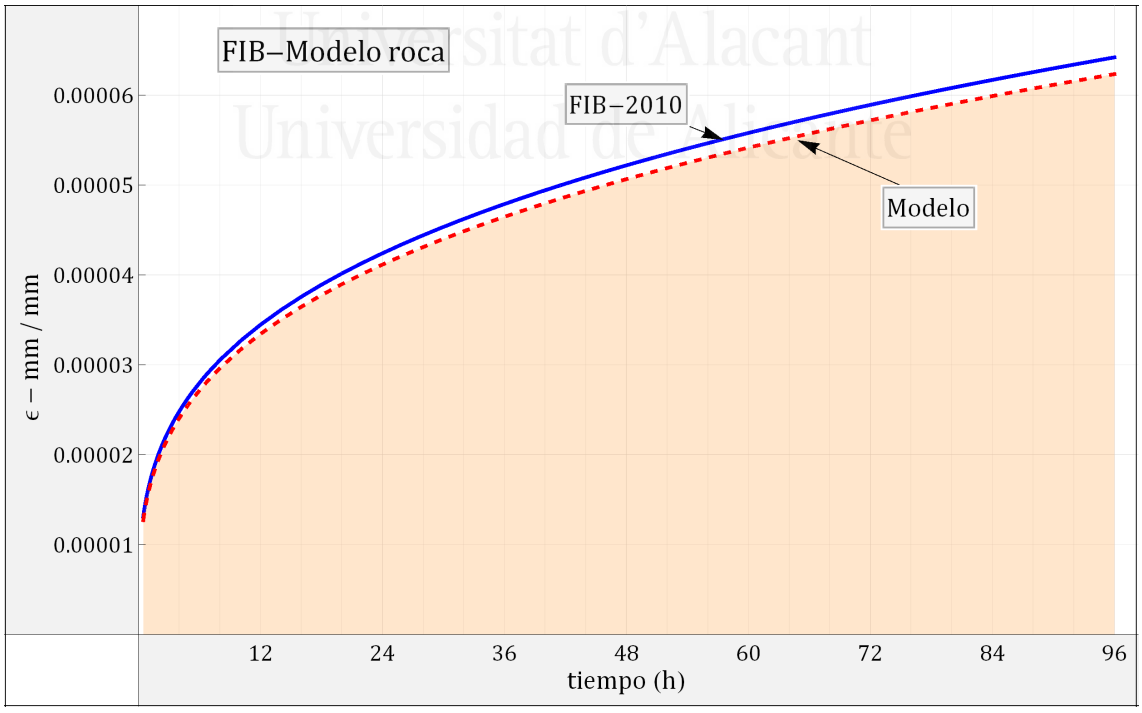


Figura 26- Modelo (FIB, 2010) (Ecuación 14) ajustado a los datos experimentales (azul) y fluencia estimada con la Ecuación 16 (rojo)

4.2. Sometimiento a altas temperaturas

La porosidad y la atenuación de las ondas ultrasónicas muestran un incremento con el aumento de la temperatura alcanzada en el proceso de calentamiento. La porosidad abierta se incrementa hasta un 14% a 600 ^{0}C, con una progresión lineal a partir de 300 ^{0}C, en las muestras enfriadas al aire. Las enfriadas con agua exhiben un mismo incremento con la temperatura, pero con menor rango de variación (7%). Esto puede deberse a la degradación mayor de los constituyentes minerales durante el más largo proceso de enfriamiento en seco. Este incremento en la porosidad se refleja en la atenuación de la onda ultrasónica, con una progresión paralela. Los valores medios de la atenuación antes del tratamiento térmico son de 3.88±0.34 dB/cm y de 3.47±0.63 dB/cm para las muestras enfriadas en seco y con agua respectivamente. Después del calentamiento los valores son de 5.46±0.47 dB/cm (aire) y 4.78±0.91 dB/cm (agua), lo que constituye una prueba de la escasa influencia del método de enfriamiento en el valor de este parámetro (39.4% en las enfriadas al aire contra 34.8% en las enfriadas con agua). Esto aparenta no reflejar el significativo mayor aumento de la porosidad en las muestras enfriadas al aire. Probablemente, debido al desarrollo de micro-fisuras distribuidas en toda la sección transversal de la muestra, causadas por los altos gradientes espaciales de temperatura durante el súbito enfriamiento, la naturaleza física del material enfriado con agua se ve ampliamente alterada, lo que se traduce en mayores incrementos de la atenuación espacial, mientras que en el material enfriado al aire el incremento de porosidad se debe en mayor medida a un aumento del tamaño de los poros existentes, afectando en menor medida a las zonas internas de las muestras y por tanto a la atenuación espacial. Todo ello origina incrementos similares de la atenuación con ambos métodos de enfriamiento, a pesar de que la porosidad aumenta más en las enfriadas al aire. Los métodos de medida tradicionales empleados para medir la porosidad son más sensibles al segundo tipo de poros, detectando de una manera menos precisa las micro-fisuras.

El módulo de Young, el coeficiente de Poisson y la resistencia a compresión uniaxial disminuyen con el incremento de la temperatura. El módulo de Young alcanza caídas del 80% a la máxima temperatura ensayada. Las medidas estáticas siguen la misma tendencia que las dinámicas con menores valores absolutos, como es esperable en material rocoso en general, y en rocas blandas en mayor medida. Las dos técnicas de medida son coherentes entre sí en cuanto a la influencia del método de enfriamiento, mostrando cambios algo más pronunciados en las muestras enfriadas con agua.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

El coeficiente de Poisson se comporta de manera similar al módulo elástico: descenso con la temperatura, algo más pronunciado en las enfriadas con agua, con idénticos resultados cualitativos con ambas técnicas de medida.

La resistencia a compresión uniaxial, obtenida con medios mecánicos, muestra un descenso aproximadamente lineal con el aumento de la temperatura, hasta llegar al 35% en las muestras enfriadas al aire, y más del 50% en las enfriadas con agua. De todos los parámetros estudiados, la resistencia a compresión uniaxial es el más sensible al método de enfriamiento. Como se observó con la porosidad y la atenuación espacial, el súbito enfriamiento con agua genera micro-fisuras que afectan a toda la sección de la pieza y a la conexión entre poros, mientras que el enfriamiento lento se focaliza en la ulterior expansión de los poros existentes o creados durante el calentamiento, con un menor impacto en la resistencia a compresión.

La durabilidad no se ve apenas afectada por el tratamiento térmico a las temperaturas estudiadas. El índice de Sehudes después de dos ciclos (Id_2) es de 98.54%. Este índice es considerado "Alto" entre 95-98% y "Muy alto" a partir de 98%. La roca estudiada se clasifica por tanto como de "Muy alta" durabilidad. Las temperaturas utilizadas en nuestros ensayos no han llegado a bajar el Id_2 de 97.8% en ningún caso. Incluso después de 5 ciclos el índice más bajo es de 95.55% (Id_5) en las muestras calentadas a 600 ^{0}C. Después de esta temperatura, la clasificación usando los dos ciclos habituales se mantiene como "Muy alta". Los cambios internos que han reducido drásticamente la resistencia y las constantes elásticas, tienen un impacto mínimo en la durabilidad medida por el *Slake Durability Test*.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.3. Relación entre módulos estáticos y dinámicos

En la *Figura 27* se representa la gráfica de módulos estáticos frente a módulos dinámicos, con los datos de las 24 muestras analizadas y la correlación propuesta. También se indican y representan las correlaciones propuestas por otros autores citados en la introducción. Puede observarse que el módulo elástico de la Piedra de San Julián se mantiene por debajo de 35 GPa incluso en las muestras intactas, y su línea de tendencia se halla comprendida entre las dos correlaciones propuestas por Eissa y Kazi (1988). La línea de k=1 divide el área de trazado de manera que la parte inferior representa los casos en los que el módulo dinámico es mayor que el estático. Esta situación se da en todos los casos analizados en esta tesis.

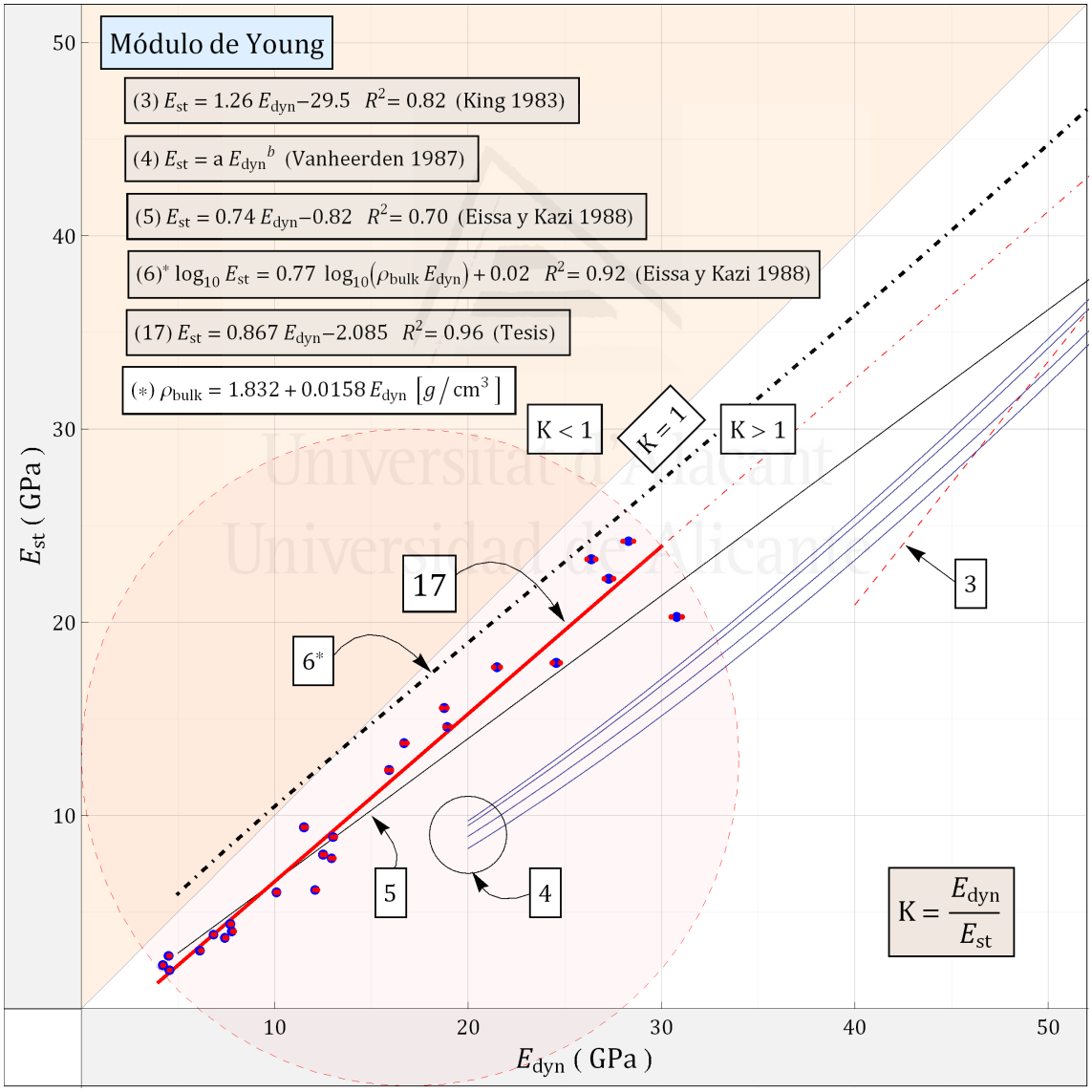


Figura 27- Relaciones entre módulos estáticos y dinámicos de la Piedra de San Julián, y correlaciones propuestas por varios autores.

Los valores de *k* obtenidos varían entre 1.13 y 2.29. Otros autores han obtenido valores entre 0.85 y 1.86 (Al-Shayea, 2004; Eissa y Kazi, 1988; King, 1983; Vanheerden, 1987), o han atribuido las diferencias a la dispersión natural de las muestras ensayadas y no al tipo de ensayo (estático o dinámico) (*k*=1) (Ciccotti y Mulargia, 2004). En Martinez-Martinez *et al.* (2012) los valores de *k* están entre 0.5 y 2.1 para rocas carbonatadas sometidas a diferentes condiciones de debilitamiento. Es decir, que el módulo dinámico –medido a 1 MHz- puede variar desde la mitad hasta más del doble que el módulo estático. En esta tesis los módulos dinámicos se han medido a 1 MHz y se ha obtenido un rango entre 30.8 GPa para la roca intacta y 4.2 GPa para la roca más deteriorada, señalando la obvia relación entre el módulo y el grado de deterioro. Los módulos estáticos máximo y mínimo correspondientes han sido 24.2 GPa y 2.0 GPa. La *Tabla 13* muestra la matriz de coeficientes de determinación, que indica algunas correlaciones significativas entre los parámetros considerados. Las funciones utilizadas para el ajuste por mínimos cuadrados son lineales en las cinco primeras filas y columnas. El resto de las funciones se han tomado de los autores citados en la introducción.

Tabla 13 - Matriz de coeficientes de determinación.

R^2	k	E_{st}	E_{dyn}	α_s	ρ_{bulk}	$m\ \alpha_s^n$	$\log_{10} E_{st}$	$\log_{10} (\rho_{bulk}, E_{dyn})$
k	1.000	*0.686*	*0.5687*	*0.272*	*0.074*	*0.268*	-	-
E_{st}		1.000	**0.961**	*0.397*	*0.035*	*0.462*	-	-
E_{dyn}			1.000	*0.404*	*0.007*	*0.458*	-	-
α_s				1.000	*0.001*	-	-	-
ρ_{bulk}					1.000	*0.001*	-	-
$m\ \alpha_s^n$						1.000	-	-
$\log_{10} E_{st}$							1.000	**0.968**
$\log_{10} (\rho_{bulk}, E_{dyn})$								1.000

Se observan dos fuertes correlaciones. La primera es una correlación lineal entre el valor del módulo estático y el valor del módulo dinámico (ambos en GPa), que proporciona un coeficiente de determinación de 0.961:

$$E_{st} = 0.867E_{dyn} - 2.085$$

Ecuación 17

La segunda correlación significativa es la que se establece entre los logaritmos decimales del módulo estático (en GPa) y el producto de la densidad aparente por el módulo dinámico, que proporciona un coeficiente de determinación de 0.968:

$$log_{10}\, E_{st} = 1.275\, log_{10}\, (\rho_{bulk}\, E_{dyn}) - 4.714$$

Ecuación 18

Hay que resaltar que estas dos relaciones se han obtenido para una calcarenita de bajo valor de módulo (es decir E_{dyn} entre 4-30 GPa). En la *Figura 28* se representan las funciones anteriores junto con los resultados obtenidos en los ensayos.

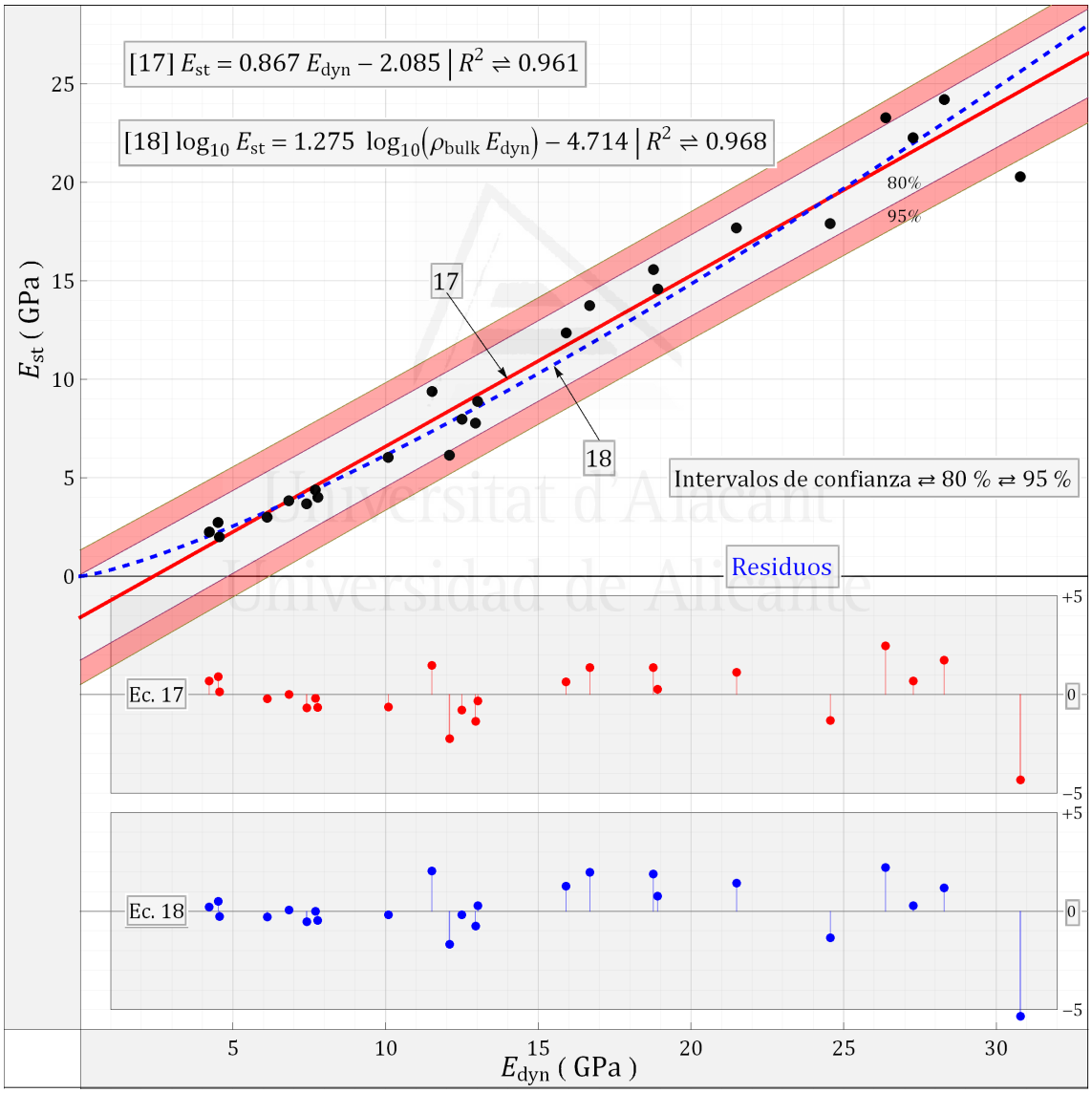


Figura 28- Resultados de los ensayos y correlaciones propuestas.

No obstante los altos coeficientes de determinación, los residuos, aleatoriamente dispersos alrededor del eje horizontal, indican que un modelo de regresión lineal es apropiado para los datos manejados. Se han trazado también las bandas para los intervalos de confianza del 80% y del 95%. Teniendo en cuenta además que la correlación entre densidad y módulo dinámico en nuestros ensayos es muy pobre, se estima que la *Ecuación 17* es más adecuada que la *Ecuación 18* en este caso, mas aún teniendo en consideración que la tendencia de la *Ecuación 18* extrapolada al rango de los altos módulos dinámicos, difiere de todas las indicadas en la *Figura 7* de la Introducción.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

5. Conclusiones

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

5. Conclusiones

Este trabajo presenta el estudio del comportamiento físico-mecánico, para su caracterización, de la Piedra de San Julián, material de base de la mayor parte de las edificaciones históricas de la ciudad de Alicante. Como se ha señalado en la introducción, se encuentran construcciones de este material desde la época ibero-romana. Se ha utilizado para construcciones de carácter civil, militar o religioso durante siglos, como elemento de mampostería predominante por la proximidad de las canteras a la propia ciudad. Así pues, el conocimiento de las propiedades mecánicas de esta roca y su evolución en el tiempo, constituye una necesidad para la gestión eficiente del patrimonio histórico-cultural. También se ha señalado la existencia de núcleos urbanos densamente poblados, e importantes vías de comunicación, en el área de influencia de taludes inestables de formaciones rocosas de este material, así como la construcción de túneles en el macizo rocoso de las antiguas canteras de la Serra Grossa, lo que abunda en la necesidad de la caracterización que aquí se ha realizado. Las conclusiones obtenidas se van a describir por separado para cada una de las tres líneas de investigación desarrolladas.

- **Fluencia.**
  - Se han realizado ensayos de fluencia con el fin de estudiar el comportamiento a largo plazo de una roca blanda.
  - Se ha definido un hormigón de referencia (tipo H01) cuyo comportamiento en fluencia primaria de acuerdo con el código (FIB, 2010) se muestra similar al de la roca estudiada.
  - Se ha observado que el modelo de fluencia para el hormigón (FIB, 2010), obtenido empíricamente y avalado por un considerable número de trabajos a lo largo de un amplio período de tiempo, puede ser aproximado mediante modelos reológicos clásicos basados en celdas de Kelvin. Las curvas de tiempo-deformación obtenidas con el modelo (FIB, 2010) -Ecuación 14- y con el modelo reológico propuesto -Ecuación 15- pueden ajustarse con el grado de precisión requerido.
  - Se ha propuesto un modelo específico basado en el código (FIB, 2010), adaptado a la roca blanda estudiada -Ecuación 16- que proporciona una precisa aproximación al comportamiento real en fluencia de la roca ensayada en el período estudiado.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Por último, señalar que el tipo de hormigón cuya curva de fluencia sigue de cerca el comportamiento de la roca ensayada, tiene una resistencia a compresión uniaxial en el momento de carga (es decir, el 98.9 % de la máxima resistencia esperada) prácticamente igual a la obtenida en nuestros ensayos para la roca seca. Esto sugiere la existencia de algún paralelismo entre el comportamiento en fluencia del hormigón y el de la roca, y como consecuencia la posibilidad de intentar la adaptación del código (FIB, 2010) para modelizar la fluencia de las rocas más allá del período estudiado.

- **Exposición a altas temperaturas.**
  - Los efectos combinados de la temperatura y el método de enfriamiento, en algunas propiedades físicas de la Piedra de San Julián, se han estudiado realizando ensayos de porosidad, atenuación de ondas ultrasónicas, constantes elásticas estáticas y dinámicas, resistencia a compresión uniaxial y durabilidad según el Slake Durability Test (SDT). La porosidad se ha obtenido por los métodos tradicionales de pesos seco, saturado y sumergido, y volumen de la muestra. Las constates elásticas se han obtenido tanto por el método estáticos como por el método dinámico a partir de las velocidades de propagación de ultrasonidos en el material. La resistencia a compresión uniaxial por ensayos mecánicos destructivos. Finalmente, la durabilidad se ha calculado según el Slake Durability Test.
  - Todos los parámetros observados reflejan el daño inducido térmicamente en la roca.
  - Excepto en los parámetros porosidad y durabilidad, las variaciones de las propiedades con la temperatura son muy pronunciadas en términos absolutos y en porcentaje, con resultados equivalentes empleando las técnicas de medida estáticas o dinámicas, en su caso.
  - El nivel de deterioro puede inferirse igualmente con las técnicas destructivas y no destructivas usadas.
  - En cuanto a la influencia del método de enfriamiento, se observa en todos los parámetros, pero la variable más sensible con diferencia es la resistencia a compresión uniaxial, con pérdidas del 34% y del 53% para las muestras enfriadas al aire y con agua respectivamente.
  - Excepto para la porosidad, los cambios producidos por el tratamiento térmico se amplifican cuando el enfriamiento se realiza por inmersión en agua. Esto puede deberse a que el enfriamiento por aire se limita a

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

incrementar el tamaño de los poros existentes o creados en el calentamiento, mientras que el enfriamiento por agua causa micro-fisuras que conectan los poros (tensiones por gradiente espacial de temperatura) degradando en profundidad las propiedades físico-mecánicas de la roca.

En resumen, los resultados obtenidos revelan la amplia influencia de la temperatura alcanzada en el proceso de calentamiento, así como del método de enfriamiento, en las propiedades estudiadas.

- **Relación entre módulos estáticos y dinámicos.**
  - En general, bajos módulos de elasticidad implican rocas muy fisuradas o dañadas. Las propiedades mecánicas, incluyendo el módulo estático, son muy dependientes del tamaño, orientación y distribución espacial de fisuras y poros.
  - Algunos estudios han mostrado que la velocidad de las ondas P es poco sensible a la variación de estas características físicas (Martinez-Martinez, et al., 2012). Esta conclusión implicaría que rocas con diferentes tipos de fisuración, y por tanto con diferentes valores de módulo estático, podrían no diferenciarse en apariencia desde el punto de vista del módulo dinámico.
  - En lo que se refiere a la Piedra de San Julián las cosas parecen ser diferentes, y esto puede deberse al hecho de que las pobres propiedades mecánicas de la roca estudiada se deben esencialmente a la debilidad de la matriz rocosa. Esta misma característica hace que las fisuras de debilitamiento se produzcan en toda la sección transversal de la pieza, sin orientaciones preferentes, afectando por igual a los resultados de las pruebas mecánicas y a la propagación de las ondas de presión. Esto proporciona una buena correlación entre los módulos estáticos y dinámicos, con lo que la calcarenita estudiada parece comportarse de manera diferenciada respecto a otras rocas metamórficas carbonatadas.
  - La tendencia general en todos los trabajos publicados referentes a rocas, tanto con ajustes de regresión lineal como no lineal, muestran valores de k por encima de la unidad, pero que tienden a converger a la unidad a medida que aumentan los valores de los módulos medidos, de manera que a partir de 120 GPa, en general las rocas tendrían módulos dinámicos y estáticos idénticos. Esto es consistente con el hecho de que muy altos

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

valores del módulo elástico son indicativos de rocas muy compactas, con muy baja porosidad, no fisuradas y con mínimas características que puedan afectar diferencialmente a los ensayos dinámicos y estáticos.

- Los modelos de regresión mostrados que tienen en cuenta la densidad aparente del material, parecen ser más adecuados para ajustar las observaciones sobre el rango completo de módulos de elasticidad en rocas, desde los más bajos a los más altos, pero presentan la desventaja de que a la hora de definir la función a representar para toda la banda es necesario asumir una correlación entre densidad aparente y módulo dinámico.
- Con módulos muy altos, la corrección que introduce la densidad aparente proporciona valores de k cercanos a la unidad, lo que es consistente con los estudios de varios autores (Al-Shayea, 2004; Eissa y Kazi, 1988; Ide, 1936; King, 1983; Vanheerden, 1987).
- Para aquellas aplicaciones en las que sea necesario el estudio de un mismo tipo de roca bajo diferentes condiciones de deterioro, parece más conveniente utilizar un ajuste lineal como el que se ha propuesto en la ecuación [17] para la banda de 4-30 GPa.
- En estos casos la densidad aparente exhibe una variación muy pequeña, difícil de relacionar directamente con el grado de desgaste del material.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Resumiendo, se concluye que en nuestro caso el módulo estático puede obtenerse con ensayos dinámicos no destructivos a partir de la relación propuesta, lo que es especialmente adecuado en intervenciones en elementos del patrimonio histórico-cultural, ya se trate de proyectar modificaciones que afecten a elementos estructurales o labores de mantenimiento preventivo.

6. Futuras líneas de investigación

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6. Futuras líneas de investigación

6.1. Trabajos en curso

La línea de investigación desarrollada en esta tesis va dirigida al conocimiento de las propiedades de un material rocoso concreto, como es la Piedra de San Julián, en las vertientes de deformación a largo plazo bajo carga constante, comportamiento frente a la exposición a altas temperaturas y métodos de diagnóstico no destructivos, esto es, obtención de los módulos de elasticidad estáticos a partir de los dinámicos. Los trabajos de continuación en curso están orientados a la consecución del doble objetivo de ampliar el conocimiento de esta piedra y extender el campo de estudio a otros tipos de roca.

En la primera línea, se están estudiando los efectos del contenido de agua y de los ciclos hielo-deshielo en las propiedades de la roca. El grado de saturación es una variable que suponemos (y hemos comprobado en algún ensayo previo) que tiene gran influencia en las propiedades mecánicas de este material. La propagación de ondas ultrasónicas también se verá alterada, por lo que habrá que reajustar las relaciones entre los módulos estático y dinámico teniendo en cuenta este parámetro.

Siguiendo con el mismo material, el estudio sobre el efecto de la exposición a altas temperaturas deberá ser extendido a los efectos de la exposición a fuego real, bajo condiciones homologables a un incendio en edificios del tipo de los construidos con esta piedra. Lo realizado hasta ahora constituye un primer paso en la investigación del impacto de un incendio en la capacidad resistente de este material, y en su vida útil de servicio como elemento estructural (Brotons*, et al.*, 2014). En esta línea se ha obtenido la colaboración del Consorcio Provincial de Bomberos, y ya se ha realizado una primera prueba con el fin de definir la metodología a seguir en los ensayos futuros. Las pruebas se realizarán en el habitáculo destinado a los ejercicios de entrenamiento del cuerpo de bomberos. Las condiciones del fuego utilizado para estas prácticas están fijadas por la carga y disposición del combustible empleado, de manera que el simulador está en el límite del *flashover* o combustión súbita generalizada, o bien se provoca puntualmente ésta en circunstancias controladas, para acercarse en lo posible al ambiente real en un incendio. Las temperaturas serán monitorizadas a distintas profundidades de los bloques expuestos al fuego, para luego poder extraer probetas de las distintas zonas y analizar los efectos del fuego en todos los niveles de la pieza.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

En la línea de ampliar el objeto de la investigación a otros materiales, se está realizando un análisis para correlacionar módulos estáticos y dinámicos de 9 tipos distintos de rocas:

- 3 rocas carbonatadas de alta porosidad.
  - Biocalcarenita: Bateig.
  - Biocalcarenita: Piedra de Montealegre.
  - Lumaquela: biocalcirudita-Golden Shell.
- 3 rocas carbonatadas de baja porosidad.
  - Caliza micrítica: Gris Pulpis.
  - Caliza travertínica con fuerte recristalización: Caliza A.
  - Mármol: Gris Macael.
- 3 rocas ígneas plutónicas.
  - Granito.
  - Gabro A.
  - GabroB.

Estas rocas cubren un amplio rango de rigideces del material, lo que permitirá por una parte confirmar la tendencia a la convergencia de ambos módulos para altas rigideces y por otra si hay continuidad, o una línea de tendencia generalizada, para todos los tipos de roca estudiados.

Tratando asimismo con otros materiales, se está trabajando en un estudio de fluencia y caracterización con dos tipos de piedra suministradas por el Politécnico de Bari (Italia), en concreto con una toba volcánica amarilla y con la conocida como "Piedra de Trani", una caliza de grano fino de color crema con incrustaciones marrones. La Catedral de Trani, también conocida como la Catedral del Mar, está construida utilizando estos dos tipos de piedra. El estudio se realiza en el marco de una colaboración de investigación surgida como resultado del interés mostrado por la citada Universidad en el estudio publicado en el artículo nº1 de los que componen el compendio de esta tesis (Brotons*, et al.*, 2013).

Finalmente, se pretende estudiar la evolución de la mineralogía y la estructura interna de la Piedra de San Julián al ser sometida a diferentes temperaturas, con el fin de explicar los cambios observados en el comportamiento mecánico de la roca teniendo en cuenta también los procesos químicos, además de los físicos. Este trabajo pretende desarrollarse en colaboración con investigadores del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Alicante y del Instituto de Geociencias de la ETS Arquitectura de la UPM.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6.2. Nuevas líneas de investigación

Para un futuro no tan próximo se está planificando el desarrollo de sensores remotos para la monitorización telemática de estructuras, taludes…, de manera que se pueda evaluar a lo largo del tiempo la evolución de diferentes parámetros de interés (deformaciones, aceleraciones, etc.), por ejemplo en edificios históricos, bajo las continuamente cambiantes condiciones ambientales de temperatura, vibraciones, saturación del material, et…

Como ampliación de los métodos de ensayo no destructivos, se prevé la puesta a punto de otros métodos de obtención del módulo dinámico, distintos del ensayo ultrasónico. A partir de la frecuencia del primer modo de resonancia longitudinal de una pieza, se puede calcular su módulo de elasticidad. Esta frecuencia se puede obtener por excitación mecánica, realizando un barrido en una banda alrededor de la frecuencia buscada (que se conoce aproximadamente) y obteniendo la amplitud de la vibración producida a cada frecuencia hasta seleccionar la máxima amplitud que corresponderá a la frecuencia de resonancia (existen dispositivos en el mercado que usan este sistema). El mayor inconveniente de este método reside en su escasa reproducibilidad: la presión entre los transductores y la pieza, y la disposición del gel de acoplamiento, tienen un carácter crítico. Por otra parte, la información disponible en este tipo de aparatos comerciales suele limitarse a dos valores numéricos: frecuencia de resonancia y coeficiente de amortiguamiento. Dado que existen muchos modos de vibración en una pieza longitudinal –y algunos de ellos de frecuencias muy próximas -, sería conveniente disponer de información gráfica de frecuencias-amplitudes de vibración para poder discriminar el modo de vibración deseado.

Otra forma en la que se pueden obtener las frecuencias de vibración es excitando la pieza en uno de sus extremos (buscamos modo longitudinal en piezas tipo barra) con un ruido blanco (que contiene todas las frecuencias) y captando la respuesta en el otro extremo con un micrófono. Una transformada de Fourier de esta respuesta permitiría pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, permitiendo la representación gráfica de frecuencia-amplitud buscada, en la que se podrían identificar las frecuencias de los distintos modos. La puesta a punto de este método y su validación con ensayos comparativos permitirán obtener los módulos dinámicos de manera perfectamente reproducible, y con la información completa de todos los modos de vibración presentes en los ensayos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

7. Referencias bibliográficas

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

7. Referencias bibliográficas

ACI, Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures, In: American Concrete Institute (Ed.) Report ACI 209R-92, (1992), pp. 1-12.

AENOR: "UNE-22950-1. Propiedades mecánicas de las rocas. Determinación de la Resistencia. Resistencia a la compresión uniaxial.", Vol 1, (1990).

AENOR: "UNE-22950-3. Propiedades mecánicas de las rocas. Ensayos para la determinación de la resistencia. Determinación del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson.", Vol (1990).

AENOR: "UNE-EN 1936: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total", Vol 1, (2007).

AENOR: "UNE 103302:1994. Determinación de la densidad relativa de las partículas. (ASTM D 854:1983)", Vol (1994).

Al-Shayea, N. A.: "Effects of testing methods and conditions on the elastic properties of limestone rock", Engineering Geology, Vol. 74, n. 1-2 (2004), pp. 139-156. doi: 10.1016/j.enggeo.2004.03.007.

Anzani, A., Garavaglia, E., Binda, L.: "Long-term damage of historic masonry: A probabilistic model", Construction and Building Materials, Vol. 23, n. 2 (2009), pp. 713-724. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.010.

AS-3600: "Concrete Structures", Standards Asociation of Australia. (1988), pp. 8-14, 32-34.

Barpi, F., Valente, S.: "A fractional order rate approach for modeling concrete structures subjected to creep and fracture", International Journal of Solids and Structures, Vol. 41, n. 9-10 (2004), pp. 2607-2621. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2003.12.025.

Baweja, S., Dvorak, G. J., Bazant, Z. P.: "Triaxial composite model for basic creep of concrete", Journal of Engineering Mechanics-Asce, Vol. 124, n. 9 (1998), pp. 959-965. doi: 10.1061/(asce)0733-9399(1998)124:9(959).

Bazant, Z. P., Baweja, S.: "JUSTIFICATION AND REFINEMENTS OF MODEL B3 FOR CONCRETE CREEP AND SHRINKAGE .2. UPDATING AND THEORETICAL BASIS", Materials and Structures, Vol. 28, n. 182 (1995), pp. 488-495. doi: 10.1007/bf02473171.

Bazant, Z. P., Baweja, S., Acker, P., Carol, I., Catarino, J., Chern, J. C., Heut, C., Wittmann, F. H., Carreira, D.: "CREEP AND SHRINKAGE PREDICTION MODEL FOR ANALYSIS AND DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES - MODEL B-3", Materials and Structures, Vol. 28, n. 180 (1995), pp. 357-365. doi:

Berest, P., Blum, P. A., Charpentier, J. P., Gharbi, H., Vales, F.: "Very slow creep tests on rock samples", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 42, n. 4 (2005), pp. 569-576. doi: 10.1016/j.ijrmms.2005.02.003.

Brotons, V., Ivorra, S., Martínez-Martínez, J., Tomás, R., Benavente, D.: "Study of creep behavior of a calcarenite: San Julián´s stone (Alicante)", Materiales De Construccion, Vol. 63, n. 312 (2013), pp. 581-595. doi: 10.3989/mc.2013.06412.

Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S.: "A calcarenite exposed to true fire conditions: a methodological proposal", A.A. Balkema Publishers, Rotterdam. The 2014 ISRM European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2014), Vigo, (2014).

Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Alarcon, J. C.: "Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian´s calcarenite", Engineering Geology, Vol. 167, n. (2013), pp. 117-127. doi: 10.1016/j.enggeo.2013.10.012.

Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A.: "Relationship between static and dynamic elastic modulus of a calcarenite heated at different temperatures: the San Julián's stone", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. BOEG-D-13-00162R3, n. (2014), pp. doi: 10.1007/s10064-014-0583-y.

BS-8110, Structural use of concrete. Part 2. Code of practice for design and construction, In: British Standards Institution (Ed.), London, (1985).

CEB/FIP: "CEB-FIP model code 1990, first draft", Comité Euro-International du Béton-Fedération Internationale de la Précontrainte. Lausanne, (1990).

CEB/FIP: "International recommendations for the design and construction of concrete structures, principles and recommendations", Comité Européen du Béton-Federation Internationale de la Précontrainte. FIP Sixth Congress, Prague, (1970), pp. 27-28.

CEB/FIP: "International system of unified standard codes of practice for structures. Volume II", Comité Euro-International du Béton-Fedération Internationale de la Précontrainte. CEB-FIP model code for concrete structures. 3rd ed., Lausanne, (1978), pp. 56, 331-344.

Ciccotti, M., Mulargia, E.: "Differences between static and dynamic elastic moduli of a typical seismogenic rock", Geophysical Journal International, Vol. 157, n. 1 (2004), pp. 474-477. doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02213.x.

Chakrabarti, B., Yates, T., Lewry, A.: "Effect of fire damage on natural stonework in buildings", Construction and Building Materials, Vol. 10, n. 7 (1996), pp. 539-544. doi: 10.1016/0950-0618(95)00076-3.

Charles, R. J., The strength of silicate glasses and some crystalline oxides, In: Proceedings of international conference on fracture (Ed.), MIT Press, Cambridge, (1959), pp. 225-250.

Damjanac, B., Fairhurst, C.: "Evidence for a Long-Term Strength Threshold in Crystalline Rock", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 43, n. 5 (2010), pp. 513-531. doi: 10.1007/s00603-010-0090-9.

Dunham, R. J., Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture, In: W.E. Ham (Ed.) Classification of Carbonate Rocks, American Association of Petroleum Geologists, (1962), pp. 108-121.

Eissa, E. A., Kazi, A.: "Relation between static and dynamic Young´s Moduli of rocks", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 25, n. 6 (1988), pp. 479-482. doi: 10.1016/0148-9062(88)90987-4.

Fanourakis, G. C., Ballim, Y.: "An assessment of the accuracy of nine design models for predicting creep in concrete", Journal of the South African Institution of Civil Engineering, Vol. 48, n. 4 (2006), pp. 2-8. doi:

Fanourakis, G. C., Ballim, Y.: "Predicting creep deformation of concrete: a comparison of results from different investigations", 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece. (2003).

Ferrero, A. M., Marini, P.: "Experimental studies on the mechanical behaviour of two thermal cracked marbles", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 34, n. 1 (2001), pp. 57-66. doi: 10.1007/s006030170026.

FIB: "Model Code 2010 - Final draft-Volume 1", Ernst & Sohn (Ed.). Fib bulletin 65, Lausanne, (2010).

Fu, Z., Guo, H., Gao, Y.: "Creep damage characteristics of soft rock under disturbance loads", Journal of China University of Geosciences, Vol. 19, n. 3 (2008), pp. 292-297. doi:

Fuenkajorn, K., Phueakphum, D.: "Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt", Engineering Geology, Vol. 112, n. 1-4 (2010), pp. 43-52. doi: 10.1016/j.enggeo.2010.01.002.

Gomez-Heras, M., Fort, R., Morcillo, M., Miolpeceres, C., Ocaña, J. L.: "Laser heating: a minimally invasive technique for studying fire-generated heating in building stone", Materiales De Construccion, Vol. 58, n. 289-290 (2008), pp. 203-217. doi:

Gomez-Heras, M., Gomez-Villalba, L. S., Fort, R.: "Cambios de Fase en Litoarenitas Calcáreas con la Temperatura: Implicaciones para el Deterioro Causado por Incendios", Macla-Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, Vol., n. 13 (2010), pp. 101-102. doi:

Guan, Z., Jiang, Y., Tanabashi, Y.: "Rheological parameter estimation for the prediction of long-term deformations in conventional tunnelling", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24, n. 3 (2009), pp. 250-259. doi: 10.1016/j.tust.2008.08.001.

Hajpal, M.: "Changes in sandstones of historical monuments exposed to fire or high temperature", Fire Technology, Vol. 38, n. 4 (2002), pp. 373-382. doi: 10.1023/a:1020174500861.

Hajpal, M., Torok, A.: " Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat ", ENVIRONMENTAL GEOLOGY, Vol. 46, n. 3-4 (2004), pp. 311-322. doi: 10.1007/s00254-004-1034-z

Ide, J. M.: "Comparison of statically and dynamically determined young's modulus of rocks", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 22, n. (1936), pp. 81-92. doi: 10.1073/pnas.22.2.81.

ISRM: "SM for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties ", ISRM Suggested Methods, Vol. 2, n. (1977), pp. 92-94. doi:

Jandakaew, M.: "Stress-path dependency of rock salt", Rock Mechanics, (2007). 978 974 533 613 1: 978 974 533 613 1

Jansen, D. P., Carlson, S. R., Young, R. P., Hutchins, D. A.: "Ultrasonic-imaging and acoustic-emission monitoring of thermally-induced microcracks in lac-du-bonnet-granite", Journal of Geophysical Research-Solid Earth, Vol. 98, n. B12 (1993), pp. 22231-22243. doi: 10.1029/93jb01816.

Jongpradist, P., Horii, H.: "Influence of water content on and relationship between strength and creep behaviors of soft rock–experimental characterization", Rock Mechanics, Vol. ISBN 978 974 533 613 1, n. (2007), pp. doi:

King, M. S.: "Static and dynamic elastic properties of rocks from the canadian shield", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 20, n. 5 (1983), pp. 237-241. doi: 10.1016/0148-9062(83)90004-9.

Kjartansson, E.: "Constant Q-wave propagation and attenuation", Journal of Geophysical Research, Vol. 84, n. NB9 (1979), pp. 4737-4748. doi: 10.1029/JB084iB09p04737.

Koca, M. Y., Ozden, G., Yavuz, A. B., Kincal, C., Onargan, T., Kucuk, K.: "Changes in the engineering properties of marble in fire-exposed columns", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 43, n. 4 (2006), pp. 520-530. doi: 10.1016/j.ijrmms.2005.09.007.

Kolesnikov, Y. I.: "Dispersion effect of velocities on the evaluation of material elasticity", Journal of Mining Science, Vol. 45, n. 4 (2009), pp. 347-354. doi:

Lorefice, R., Else, G., Lopez, C. M., Carol, I.: "Mesomechanic analysis of time dependent concrete behavior", Computational Modelling of Concrete Structures, (2006). 0-415-39749-9: 0-415-39749-9

Louis Cereceda, M., Garcia-del-Cura, M. A., Spairani, Y., de Blas, D.: "The Civil Palaces in Gravina street, Alicante: building stones and salt weathering", Materiales De Construccion, Vol. 51, n. 262 (2001), pp. 23-37. doi:

Martín, J. D.: " Using XPowder: A software package for Powder X-Ray diffraction analysis.", (2004). 84-609-1497-6: 84-609-1497-6

Martinez-Martinez, J., Benavente, D., Garcia-del-Cura, M. A.: "Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 71, n. 2 (2012), pp. 263-268. doi: 10.1007/s10064-011-0399-y.

Mazloom, M.: "Estimating long-term creep and shrinkage of high-strength concrete", Cement & Concrete Composites, Vol. 30, n. 4 (2008), pp. 316-326. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.09.006.

Nadimi, S., Shahriar, K., Sharifzadeh, M., Moarefvand, P.: "Triaxial creep tests and back analysis of time-dependent behavior of Siah Bisheh cavern by 3-Dimensional Distinct Element

Method", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 26, n. 1 (2011), pp. 155-162. doi: 10.1016/j.tust.2010.09.002.

Papa, E., Taliercio, A.: "A visco-damage model for brittle materials under monotonic and sustained stresses", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 29, n. 3 (2005), pp. 287-310. doi: 10.1002/nag.415.

Ranjith Pathegama, Gamage , Viete, Daniel R., Chen, Bai Jie, Perera, M. Samintha, A.: "The effect of temperature on the mechanical behavior of Hawkesbury sandstone at atmospheric pressure", Engineering Geology, Vol. doi:10.1016/j.enggeo.2012.09.007, n. (2012), pp. doi:

Rao, Q.-h., Wang, Z., Xie, H.-f., Xie, Q.: "Experimental study of mechanical properties of sandstone at high temperature", Journal of Central South University of Technology, Vol. 14, n. (2007), pp. 478-483. doi: 10.1007/s11771-007-0311-x.

RILEM-Model_B3: "Creep and shrinkage model for analysis and design of concrete structures-Model B3", draft: RILEM Recommendations, prepared by Z. P. Bazant S. Baweja. (1995), pp. Materials and Structures, 28:357-365, 415-430, 488-495, with Errata in Vol 329 (1996) p. 1126.

SABS-0100: "Code of Practice for the Structural Use of Concrete. Part 1: Design", Soth African Bureau of Standards. Pretoria, (1992).

Sánchez, R.: "Estudio petrográfico y petrofísico de la piedra de San Julián", Universidad de Alicante (internal report), Vol., n. (2005), pp. doi:

Shao, J. F., Zhu, Q. Z., Su, K.: "Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation", Computers and Geotechnics, Vol. 30, n. 7 (2003), pp. 549-555. doi: 10.1016/s0266-352x(03)00063-6.

Sterpi, D., Gioda, G.: "Visco-Plastic Behaviour around Advancing Tunnels in Squeezing Rock", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 42, n. 2 (2009), pp. 319-339. doi: 10.1007/s00603-007-0137-8.

Tsai, L. S., Jeng, F. S., Lin, M.: "Water Effects And Creep Behavior of Sandstone Weakening", The Sixteenth KKCNN Symposium on Civil Engineering, Vol., n. (2003), pp. doi:

Vanheerden, W. L.: "General relations between static and dynamic moduli of rocks", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 24, n. 6 (1987), pp. 381-385. doi:

Vasarhelyi, B., Van, P.: "Influence of water content on the strength of rock", Engineering Geology, Vol. 84, n. 1-2 (2006), pp. 70-74. doi: 10.1016/j.enggeo.2005.11.011.

Weng, M. C., Tsai, L. S., Hsieh, Y. M., Jeng, F. S.: "An associated elastic-viscoplastic constitutive model for sandstone involving shear-induced volumetric deformation", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 47, n. 8 (2010), pp. 1263-1273. doi: 10.1016/j.ijrmms.2010.08.022.

Wu, Z., Qin, B.-d., Chen, L.-j., Luo, Y.-j.: "Experimental study on mechanical character of sandstone of the upper plank of coal bed under high temperature", Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, Vol. 24, n. 11 (2005), pp. 1863-1867. doi:

Yavuz, H., Demirdag, S., Caran, S.: "Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 47, n. 1 (2010), pp. 94-103. doi: 10.1016/j.ijrmms.2009.09.014.

Zhang, J. X., Davis, D. M., Wong, T. F.: "The brittle-ductile transition in porous sedimentary-rocks - geological implications for accretionary wedge aseismicity", Journal of Structural Geology, Vol. 15, n. 7 (1993), pp. 819-830. doi:

Zhang, L., Mao, X., Lu, A.: "Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature", Science in China Series E-Technological Sciences, Vol. 52, n. 3 (2009), pp. 641-646. doi: 10.1007/s11431-009-0063-y.

Zuan, C.: "Analysis of a microcrack model and constitutive equations for time-dependent dilatancy of rocks", Geophysical Journal International, Vol. 155, n. 2 (2003), pp. 601-608. doi: 10.1046/j.1365-246X.2003.02067.x.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

PARTE SEGUNDA

Compendio de artículos

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1. Artículo primero

Brotons, V., Ivorra, S., Martínez-Martínez, J., Tomás, R., Benavente, D.: *"Study of creep behavior of a calcarenite: San Julián´s stone (Alicante)"*, Materiales De Construccion, Vol. 63, n. 312 (2013), pp. 581-595. doi: 10.3989/mc.2013.06412.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Materiales de Construcción

Volumen 63 Nº 312 **octubre-diciembre 2013** Madrid (España) ISSN: 0465-2746

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Materiales de Construcción
Vol. 63, 312, 581-595
octubre-diciembre 2013
ISSN: 0465-2746
eISSN: 1988-3226
doi: 10.3989/mc.2013.06412

Estudio de la fluencia de una calcarenita: la Piedra de San Julián (Alicante)

Study of creep behavior of a calcarenite: San Julián´s stone (Alicante)

V. Brotóns(*), S. Ivorra(*), J. Martínez-Martínez(*,**), R. Tomás(*), D. Benavente(*,**)

Recepción/Received: 10-XII-12
Aceptación/Accepted: 7-V-13

RESUMEN

La fluencia de las rocas tiene gran importancia en la evaluación del comportamiento a largo plazo de elementos construidos con estos materiales. En este trabajo, se ha caracterizado física y mecánicamente una calcarenita porosa bien conocida localmente como Piedra de San Julián. Se han realizado ensayos de compresión uniaxial de 96 h. a carga constante. Se ha utilizado un modelo de fluencia bien conocido, el Código-modelo CEB-FIP 2010, usado para modelizar otro material pétreo (hormigón). Además, se ha propuesto un modelo reológico. El objetivo principal de este trabajo es investigar la posibilidad de aprovechar la gran experiencia acumulada en el estudio del hormigón, con el fin de obtener un enfoque para el comportamiento de la roca, para tiempos de prueba muy largos difíciles de implementar en laboratorio. Se propone una función de fluencia adaptada a la roca estudiada dependiente sólo de sus características elásticas y mecánicas.

Palabras clave: modelo reológico; fluencia; roca blanda; caliza; calcarenita.

ABSTRACT

Rocks creep has a great importance in the evaluation of the long-term behaviour of elements built with or within these materials. In this work, a porous well-known limestone locally named as San Julián stone has been physically and mechanically characterized. Uniaxial compressive tests for 96 h. at constant stress are carried out. Long-term behaviour has been modelled by means of a well-known creep model, the CEB-FIP Model code 2010, used for modelling other stony-material (i.e. concrete). Furthermore, a rheological model has been proposed. The main aim of this work is to investigate the possibility of exploiting the vast experience accumulated in the study of concrete deformational long-term behaviour in order to obtaining a reasonable approach to the behaviour of the rock, for too long testing times difficult to implement in laboratory. A creep function adapted to the studied rock only dependent on its elastic and mechanical characteristics is also proposed in this work.

Keywords: *rheological model; creep; soft rock; limestone; calcarenite.*

(*) Universidad de Alicante (Alicante, España).
(**) Unidad Asociada CSIC- Universidad de Alicante (Alicante, España).

Persona de contacto / *Corresponding author*: vicente.brotons@ua.es

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales rocosos pueden sufrir altas deformaciones a largo plazo cuando se someten a carga constante (fluencia). El conocimiento del comportamiento en fluencia de las rocas es crucial para determinar el factor de seguridad de los túneles, edificios históricos con grandes muros de sillería, y en general en todos los tipos de obras en las que la roca actúa como un componente estructural o como apoyo de cargas de cimentación (zapatas, estribos de presas, etc.). Este fenómeno ha sido estudiado y modelado por varios autores, aunque el volumen de referencias existentes sobre rocas es mucho menor que para los fenómenos de fluencia en hormigón. Algunos estudios se centran en el desarrollo de técnicas para la construcción y mantenimiento de túneles, utilizando modelos reológicos o ecuaciones constitutivas (1, 2). Otros investigadores estudian el impacto de la fluencia en macizos rocosos mediante la medición de las deformaciones en las excavaciones y proponen modelos para reproducir este comportamiento (3) o, basándose en estudios en laboratorio de muestras de rocas intactas, proponen modelos reológicos y predicen las deformaciones de fluencia (4). Propuso (5) un modelo constitutivo para el comportamiento en fluencia de los llamados geomateriales, en el que la deformación por fluencia se atribuye a cambios macroscópicos en la microestructura de los materiales (cambios mecánicos, físicos y químicos). De manera similar, pero relacionando la deformación diferida sólo con la generación de microgrietas, (6) analiza la deformación volumétrica por medio de un modelo constitutivo. Existen trabajos centrados en el estudio de la influencia del tipo de prueba (stress-path) (7). Estudió (8) la fluencia lenta causada por cargas muy bajas. Analizó (9) la influencia de los ciclos de carga-descarga. Finalmente (10), estudió los cambios en las características micro-mecánicas de las rocas bajo cargas de gravedad, que afectan directamente al fenómeno de la fluencia. Otro enfoque consiste en el estudio de las rocas como material de construcción. En este sentido (11), estudió la deformación a largo plazo en la mampostería de edificios históricos. En cuanto a mineralogía y propiedades físicas, (12) ha mostrado que las rocas de estructura cristalina (ígneas o metamórficas) presentan rotura frágil incluso con bajos niveles de carga, con un comportamiento viscoelástico en el que la componente viscosa tiene muy poco peso. En las rocas sedimentarias en general la viscosidad adquiere mayor importancia, dando lugar a mayores deformaciones a más largo plazo (13). La porosidad es esencial, (14) distingue entre parte dura (matriz) y parte blanda (poros, fracturas, fisuras…). La parte blanda está sujeta a grandes deformaciones. Las deformaciones de la parte dura son pequeñas, y dentro del rango que permite su estudio con las relaciones tensión-deformación usuales en ingeniería. El efecto del contenido de agua o grado de humedad se ha estudiado en (15, 16) mostrando que afecta de manera importante tanto a la resistencia como

1. INTRODUCTION

Rock materials can suffer high long-term deformations when subjected to constant compressive load (creep). The knowledge of creep behaviour of rocks is crucial for determining the safety factor of tunnels, historic buildings with large ashlar walls, and generally in all types of works in which the rock acts as a structural component or is the support of foundation loads (e.g. foundations, dam abutments, etc.). This phenomenon has been studied and modelled by several authors, although the volume of existing literature on rocks is much lower than for concrete creep phenomena. Some studies are focused on developing techniques for the building and maintenance of tunnels, using rheological or constitutive models (1, 2). Other researchers study the impact of creep on rock masses by measuring the deformations in excavations and proposing a model for reproducing their behaviour (3), or based on laboratory studies of intact rocks samples and rheological models for predicting the creep deformations (4). (5) Proposed a constitutive model for creep behaviour of the so called geomaterials, in which it is deemed as the consequence of macroscopic changes in the materials microstructure (i.e. mechanical, physical and chemical changes). Similarly, but simply relating the deferred deformation with the generation of micro-cracks, (6) analysed the volumetric deformation by means of a constitutive model. There are several works focused on the study of the influence of the type of test (stress-path) (7). (8) Studied the slow creep caused by very low loads. (9) analysed the influence of the charge-discharge cycles. Finally, (10) studied the changes in the micromechanical characteristics of rocks under gravity loads, which directly affect the creep phenomenon. Another approach consists on the study of rocks as a construction material. In this sense, (11) studied the long-term deformation in the masonry of historic buildings. As mineralogy and physical properties, (12) shows that the crystalline structure of rocks (igneous *or metamorphic) exhibit brittle fracture even at low load levels, with a viscoelastic behaviour where the viscous component has little weight. Generally in sedimentary rocks viscosity is a more determining factor, leading to greater deformations in the longer term (13). Porosity is essential, (14) distinguishes between the hard part (matrix) and the soft part (pores, fractures, cracks ...). The soft part is subject to large deformations were compressed. Strains in the hard part are small, and within the range that allows the study of the stress-strain relations usual in engineering. The effect of water content or moisture level has been studied (15, 16) showing that significantly affects both the strength and the long term deformation. Weak rocks are more sensitive to the presence of water. The important deformations in dry rock increase markedly. The brittle fracture, they can become ductile*

a la deformación a largo plazo. Las rocas débiles son más sensibles a la presencia de agua. Las deformaciones ya importantes de la roca seca, se incrementan. Las roturas frágiles pueden llegar a convertirse en dúctiles con altos contenidos de agua. La fluencia terciaria se presenta sólo con muy alto contenido en agua en algunos casos (15).

at high water contents. Tertiary creep occurs only with very high water content in some cases (15).

Aunque la mayoría de los estudios citados se desarrollaron bajo condiciones de laboratorio utilizando muestras de roca intactas, hay que señalar que no existe un procedimiento unificado para desarrollar los ensayos de fluencia a largo plazo. Uno de los problemas más comunes en los estudios arriba mencionados es la breve duración de las pruebas de laboratorio y la extrapolación correcta de los resultados obtenidos a la fluencia real sufrida por las rocas.

Although most of the cited studies were developed under laboratory conditions using intact rock samples it should be noted the lack of a unified procedure to develop the long-term creep tests. One of the most common problems in the above listed studies is the brief duration of the laboratory tests and the assumed extrapolation of the obtained results to the real long term creep actually suffered by rocks.

El objetivo de este trabajo es aprovechar los modelos de fluencia conocidos establecidos para el hormigón (17) y adaptarlos a la roca blanda estudiada con el fin de estimar la fluencia a largo plazo de las rocas.

The aim of this paper is to take advance of the well-known creep models established for concrete (17) and to adapt them to the studied weak rock in order to estimate the long-term creep of rocks.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2. MATERIALS AND METHODS

El estudio de la fluencia a largo plazo de las rocas se aplicó a una piedra caliza porosa ampliamente utilizada como material de construcción en la ciudad de Alicante (SE de España). Esta caliza se conoce localmente como *Piedra de San Julián*. Forma los principales afloramientos de las colinas que rodean el perímetro urbano de la ciudad. Estos afloramientos han actuado como canteras durante siglos y han proporcionado los sillares de los principales edificios históricos de la ciudad. Por otra parte, las líneas de tranvía futuras de la red de transporte público se construyen a través de estas colinas y, por consiguiente, la piedra caliza porosa estudiada constituirá el soporte geotécnico de los túneles del tranvía. De hecho, las muestras estudiadas en este trabajo se obtuvieron a partir de bloques de piedra extraídos de la excavación de la línea de tranvía. Todas estas razones justifican la importancia de obtener un valor fiable de la fluencia a largo plazo de esta roca específica.

The study of the long-term creep of rocks was applied to a porous limestone widely used as building material in Alicante city (SE of Spain). This limestone is locally known as Piedra de San Julián. *It forms the main outcrops of the hills surrounding the urban perimeter of the city. These outcrops acted as quarries for ages and they provided the ashlars for the main historic building of the city. Moreover, the future tram lines of the public transport network of the city are being built through these hills, and consequently, the studied porous limestone will constitute the geotechnical support of the tram tunnels. In fact, the samples studied in this paper were obtained from rock blocks extracted from the excavation of the tram line. All these reasons justify the relevance of obtaining a reliable value of long-term creep of this specific rock.*

Se tomaron rocas de la Serra Grossa, situada en el noreste del casco urbano de Alicante. Las probetas de roca estudiadas en este trabajo se obtuvieron a partir de bloques recogidos de la excavación del túnel del tranvía. Los bloques de roca fueron recogidos justo después de la excavación y se transportaron al laboratorio en donde se extrajeron probetas por medio de un taladro con broca hueca.

Samples were taken from the Serra Grossa hill, located at the NE of the urban area of Alicante. Rock samples studied in this paper were obtained from rock blocks collected from the dump of the tram tunnel. The rock blocks were collected just after the excavation and transported to the laboratory where the samples where extracted by means of a drill.

El procedimiento fue el siguiente: En primer lugar, se llevaron a cabo ensayos de fluencia a corto plazo de las rocas en el laboratorio. En segundo lugar, la fluencia a largo plazo se calculó a partir de dos modelos diferentes (reológico y Código-modelo CEB-FIP) (17). Este último

The research procedure was as follows: Firstly, short-term creep tests were carried out on rock samples in laboratory. Secondly, the long-term creep was calculated from two different models (rheological model and CEB-FIP model) (17). This latest model is widely applied to

modelo se aplica ampliamente a la fluencia del hormigón, y las variables del modelo se han adaptado a las características específicas de las rocas. La comparación entre los resultados obtenidos con ambos procedimientos (pruebas a corto plazo y modelos a largo plazo) permite establecer la deformación de la roca bajo tensión constante en períodos de tiempo muy largos.

Para la realización de los taladros se tuvo en cuenta la orientación de los planos de estratificación en los bloques, de manera que en las probetas cilíndricas obtenidas estos planos de estratificación quedaran perpendiculares al eje de cilindro.

Se obtuvieron 10 muestras cilíndricas de diámetro 54 mm y 100 mm de altura para las pruebas petrofísicas y mecánicas (ultrasonidos, porosidad y densidad, resistencia y fluencia a tensión constante). En primer lugar se llevó a cabo la caracterización mineralógica y petrográfica. En segundo lugar, se obtuvo la resistencia de la roca por medio de ensayos de compresión uniaxial (18). En tercer lugar, se llevaron a cabo las mediciones de las deformaciones bajo tensión constante, que se fijó en el 45% de la tensión previamente determinada. Estas mediciones directas dieron la fluencia real de la roca durante las primeras 96 horas bajo tensión constante. Finalmente, se aplicaron dos modelos con el fin de conocer el comportamiento a la fluencia a largo plazo de las rocas. El código CEB-FIP, originalmente definido para el hormigón, se adaptó a la roca estudiada por medio de la selección de valores específicos para las variables utilizadas en el código. Además, se estableció un modelo reológico con diferentes celdas de Kelvin. Ambos modelos se ajustaron para las medidas de deformación reales obtenidas durante las pruebas de laboratorio.

2.1. Ultrasonidos

Las ondas ultrasónicas se midieron utilizando un equipo emisor-receptor de señal (Panametrics-NDT 5058PR) acoplado a un osciloscopio (Tektronix TDS-3012B), que registra y digitaliza formas de onda, lo que permite su manipulación y almacenamiento. Se utilizaron dos tipos diferentes de transductores Panametric: un par no-polarizado y un par S-polarizado (ondas S). El primer par fue utilizado con el fin de emitir-recibir la onda ultrasónica y a partir de ahí estudiar y cuantificar el tiempo utilizado por la onda en recorrer el material. El segundo par de transductores ultrasónicos se empleó exclusivamente para medir la velocidad de propagación de la onda S. Se utilizó un medio de acoplamiento visco-elástico para lograr un buen acoplamiento entre el transductor y la muestra. La frecuencia de ambas parejas de transductores es de 1 MHz. Se han calculado tres parámetros ultrasónicos a partir de cada forma de onda registrada: velocidad de las ondas P (Vp); velocidad de las ondas S (Vs); y atenuación espacial (α_s). La velocidad de

creep of concrete, and model variables were adapted to specific characteristics of the rock type. The comparison between the results obtained from both procedures (short-term tests and long-term models) allows authors to establish the rock strain under constant stress at very long periods of time.

The orientation of stratification planes in the blocks were taken into account when drilling the rocks, so that these stratification planes are perpendicular to the cylinder axis in the cylindrical samples obtained.

10 cylindrical samples of 54 mm diameter and 100 mm height were obtained for petrophysical and mechanical tests (ultrasounds, porosity and density, strength and creep under constant stress). Firstly, petrographic and mineralogical characterization was carried out. Secondly, rock strength was obtained from uniaxial compressive strength test (18). Thirdly, strains measurements were carried out on rock samples under constant stress, which was fixed as 45% of the previously determined strength. These direct measurements allowed calculating the real rock creep during the first 96 hours under constant stress. Finally, two models were applied in order to estimate the long-term creep behaviour of rocks. The CEB-FIP code, originally defined for concrete, was adapted to the studied rock by means of the selection of specific values for the variables used in the code. Furthermore, a rheological model was established with different Kelvin cells. Both models were adjusted to the real and direct strain measurements obtained during the laboratory test periods.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2.1. Ultrasounds

Ultrasonic waves were measured using a signal emitting-receiving equipment (Panametrics-NDT 5058PR) coupled to an oscilloscope (TDS 3012B-Tektronix), which acquires and digitalises waveforms allowing them to be displayed, manipulated and stored. Two different kinds of Panametric transducers were used: a non-polarized transducer couple and a S-polarized transducer couple. The first couple was used in order to acquire the ultrasonic waveform and thereafter to study and quantify it in time-domain. The second ultrasonic transducer couple was employed exclusively to measure the S-wave propagation velocity. A visco-elastic couplant was used to achieve good coupling between the transducer and the sample. The frequency of both transducer couples is centred in 1 MHz. Three ultrasonic parameters were computed from each registered waveform: ultrasonic P-wave velocity (Vp); ultrasonic S-wave velocity (Vs); and spatial attenuation (α_s). P-wave velocity (Vp) is the most

las ondas P (Vp) es el parámetro ultrasónico más ampliamente utilizado, y se determina por la relación entre la longitud de la muestra y el tiempo de tránsito del pulso. α_s cuantifica la pérdida de energía durante la propagación de las ondas a través de un material. Esta cuantificación se realizó por comparación de la amplitud de la señal emitida por el sensor del transmisor y la amplitud de la registrada en la señal recibida por el sensor receptor (19). Por otra parte, la atenuación espacial se normalizó con respecto a la distancia entre los sensores de transmisor y receptor. α_s se calculó según la ecuación [1]:

widely-used ultrasonic parameter and it was determined from the ratio of the length of the specimen to the transit time of the pulse. α_s quantifies the energy lost during wave propagation through a material. This quantification was performed by comparing the amplitude of the signal emitted by the transmitter sensor and the amplitude recorded in the signal received by the receptor sensor (19). Moreover, spatial attenuation was normalised with respect to the distance between transmitter and receptor sensors. α_s was calculated according to equation [1]:

$$\alpha_s \left(\frac{dB}{cm}\right) = \frac{20 \log \left[\frac{Ag}{A_{mx}}\right]}{L} \qquad [1]$$

donde A_e es la amplitud máxima emitida por el sensor transmisor A_{mx} es la amplitud máxima (en valores absolutos) registrada por el sensor receptor, y L es la longitud de la muestra.

where A_e is the maximum amplitude emitted by the transmitter sensor and A_{mx} is the maximum amplitude (in absolute values) registered by the receptor sensor, and L is the length of the sample.

2.2. Resistencia a compresión uniaxial

Las muestras de roca se secaron en un horno a 105 °C durante 24 horas y se sometieron a la prueba de resistencia a compresión uniaxial. Por la forma en que se extrajeron las pobretas, los ensayos de compresión se han realizado en dirección perpendicular a los planos de estratificación. Otros autores han demostrado que el control de este aspecto es importante, ya que la anisotropía del material y la colocación de la piedra en relación con la orientación de las discontinuidades, determina el comportamiento estructural en su utilización en monumentos o cimentaciones (20-22). La velocidad de carga de la prueba se estableció en 0,5 MPa/s, de acuerdo con el procedimiento estándar español (18). Estos valores obtenidos de resistencia a compresión se utilizaron como referencia para establecer la carga en la prueba a tensión constante de los ensayos de fluencia realizados en dos muestras de roca adicionales, secadas en las mismas condiciones.

2.2. Uniaxial compressive strength

Rock samples dried in an oven at 105 °C for 24 hours were subjected to uniaxial compressive strength test. By the way in which the samples were manufactured, compression tests were performed in a perpendicular direction to the bedding planes. Other authors have shown that control of this aspect is important, since the anisotropy of material and placement of the stone in relation to the orientation of the discontinuities, are determinant in the structural behaviour of stone in monuments or foundations (20-22). The loading rate of the test was established at 0.5 MPa/s, according to the Spanish standard procedure (18). These obtained compressive strength values were used as reference value for setting the constant stress tests (the two creep tests) performed over two additional rock samples dried in the same conditions.

2.3. Compresión uniaxial a carga constante

Las muestras fueron ensayadas en una prensa controlada digitalmente con el fin de mantener una carga constante a lo largo de todo el período de pruebas. La medición de la deformación se hizo con galgas resistivas conectadas a un sistema de adquisición de datos Spider 8 de HBM, a través del software Catman Easy. La medición de las deformaciones axiales y transversales se realizó utilizando dos galgas axiales y dos transversales situadas en puntos de la muestra diametralmente opuestos. El proceso de carga se llevó a cabo en dos rampas (Figura 1): la primera hasta 10 kN (4,3 MPa) (etapa 1) y la segunda hasta 40 kN (17,2 MPa) (etapa 3) mantenidos hasta el final de la prueba. Como se ha mencionada anteriormente, el valor de carga constante utilizada en el ensayo de fluencia

2.3. Uniaxial compression at constant load

The samples were tested using a digitally controlled press in order to maintain a constant load along the whole testing period. The strain measurement was made with resistive strain gauges connected to a data acquisition system Spider 8 of HBM, using Catman Easy software. The measurement of axial and transverse strains was performed using two axial and two transverse gauges located opposite each other. The loading process was conducted in two stages (Figure 1): the first up to 10 kN (4.3 MPa) (stage 1) and the second up to 40 kN (17.2 MPa) (stage 3) kept constant until the end of the test. As it was aforementioned, the constant load value used in the creep test was stated by preliminary tests, so that the final stress, kept constant during the test, was

se obtuvo mediante ensayos preliminares, de modo que la tensión final, mantenida constante durante la prueba, fue del 45% de la resistencia a compresión uniaxial. Las pruebas se realizaron en una sala de termo-regulada a una temperatura de 25±2 °C. Este rango de temperatura asegura que nos mantengamos en la zona plana de la curva de corrección de las galgas utilizadas (que corresponde a corrección nula).

45% of the uniaxial compressive strength. Tests were performed in a thermo-regulated room with temperature of 25±2 °C. This temperature range ensures that tests conditions remain in the flat zone of the correction curve of the used gauges (that is no correction required).
Figure 1. Loading process

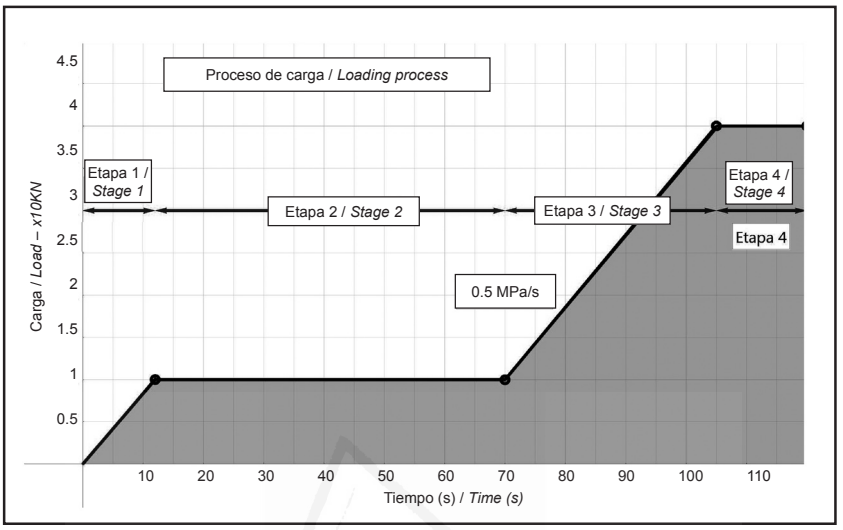


Figura 1. Proceso de carga.
Figure 1. Loading process.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1. Petrografía y mineralogía

La composición mineralógica de la roca en polvo fue analizada por difracción de rayos X. Los datos se recogieron e interpretaron utilizando el paquete de software XPowder (23). El procedimiento de búsqueda de coincidencia cualitativa se ha realizado con la base de datos de ICDD-PDF2. Los componentes principales son la calcita (70%), dolomita rica en hierro (25%), cuarzo (5%) y trazas de minerales de arcilla (illita). Desde un punto de vista petrográfico, la roca corresponde a una biocalcarenita muy porosa clasificada como Grainstone según Dunham (24). Texturalmente, esta roca presenta aloquímicos abundantes, por lo general de menos de 2 mm de tamaño, aunque también se encuentran bandas de varios tamaños de grano. Dentro de la gran variedad de briozoos fósiles, foraminíferos, algas rojas, fragmentos de equinodermos (placas y radiolas) son los más abundantes. La fracción ortoquímica corresponde principalmente a micrita (25). La roca estudiada presenta valores medio-altos de porosidad abierta (20,0 ± 2,0%) y una densidad aparente de 2,16±0,04 g/cm^3 (según la Norma UNE-EN 1936: 2007) (26).

3. EXPERIMENTAL RESULTS

3.2. Petrography and mineralogy

The mineralogical composition of rock was analyzed by powder X-ray diffraction. Data were collected and interpreted using the XPowder software package (23). The qualitative search-matching procedure was based on the ICDD-PDF2 database. The main components are calcite (70%), iron-rich dolomite (25%), quartz (5%) and traces of clay minerals (illite). From a petrographical point of view, the studied rock corresponds to a very porous biocalcarenite classified as Grainstone according to Dunham (24). Texturally, this rock presents abundant allochemicals, generally less than 2 mm size, although bands of various grain sizes can be found. Within the great variety of fossil bryozoans, foraminifera, red algae, echinoderms fragments (plates and radiolas) are the most abundant. The ortochemical fraction corresponds mainly to micrite (25). The studied rock presents medium-high values of open porosity (20.0 ± 2.0%) and a bulk density of 2.16±0.04 g/cm^3 (according to standard UNE-EN 1936: 2007) (26).

3.2. Ultrasonidos

La Tabla 1 muestra las velocidades de propagación de las ondas P y S (V_p y V_s), el coeficiente de Poisson dinámico (ν_d), el módulo de Young dinámico (E_d) y la atenuación espacial (α_e) obtenidas en los ensayos.

3.2. Ultrasounds

Table 1 shows the P and S waves velocities propagation values (V_p and V_p), the dynamic Poisson's ratios (ν_d), the dynamic Young's modules (E_d) and the spatial attenuation (α_e) obtained in the tests.

Tabla 1 / *Table 1*
Propagation velocities (Vp and Vs), dynamic modulus (νd and Ed) and spatial attenuation (αe).
Velocidades de propagación (Vp y Vs), módulos dinámicos (νd y Ed) y atenuación espacial (αe).

	Ondas P / *P Waves*	Ondas S / *S Waves*	Módulos dinámicos / *Dynamic modulus*		Atenuac. / *ATT.*
Ejemplo / *Sample*	V_p	V_s	V_d	E_d	α_ε
Probeta / *test*	(Km.s^{-1})	(Km.s^{-1})		(GPa)	(dB.cm-1)
1	3.68	2.17	0.24	24.47	3.24
2	3.87	2.32	0.22	28.85	2.94
3	3.85	2.24	0.24	27.03	3.34
4	3.72	2.18	0.24	25.20	3.44
5	3.84	2.14	0.28	24.50	3.43
6	3.80	2.17	0.26	25.14	3.72
7	3.86	2.02	0.31	23.07	5.58
8	3.80	2.27	0.22	27.13	3.43
9	3.96	2.34	0.23	29.95	3.23
10	3.90	2.34	0.22	29.42	3.30
Media / *Average*	3.83±0.08	2.22±0.10	0.25±0.03	26.48±2.24	3.56±0.70

Los valores de velocidad obtenidos corresponden a un rango "Medio" (27). Por otra parte, atendiendo a la clasificación de Farmer (28), se puede afirmar que los módulos dinámicos medidos son típicos de una calcarenita muy porosa con un bajo grado de cementación.

The obtained velocity values correspond to a " Medium" velocity range (27). Furthermore, attending to Farmer's classification (28), it can be stated that the measured dynamic modules are typical of a very porous calcarenite with a low cementation degree.

3.3. Compresión uniaxial

3.3.1. Resistencia a compresión uniaxial

El valor medio obtenido para la resistencia a compresión uniaxial es de 37,88±2,64 MPa. De acuerdo con este valor, esta roca está incluida en la clase R_2 (Roca Moderadamente Débil) según la clasificación de la ISRM (29).

3.3. Uniaxial compression

3.3.1. Uniaxial compressive strength

The obtained average value of rock uniaxial compressive strength was 37.88±2.64 MPa. According to this value, this rock is included in the R_2 class (Moderately Weak Rocks) attending to the ISRM classification (29).

3.3.2. Fluencia bajo carga constante

La Figura 2 muestra el total de deformación axial medida en la muestra-1, incluyendo tanto las deformaciones instantáneas como diferidas. La Figura 3 muestra la deformación debida sólo a la fluencia. La deformación instantánea se ha restado de la deformación axial total. El módulo de Young (E_r) y el coeficiente de Poisson (ν) han sido calculados con las ecuaciones [2] y [3].

3.3.2. Creep under constant load

Figure 2 shows the total measured axial strain in sample-1, including both instantaneous and deferred deformations. Figure 3 shows the strain only due to creep. Notice that instantaneous strain has been subtracted from total axial strain. Young modulus (E_r) and Poisson's ratio (ν) were calculated from equations. [2] and [3]:

$$E_r = \frac{\sigma}{\varepsilon_x} \qquad [2]$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_x} \qquad [3]$$

Donde σ es la tensión axial, y ε_x y ε_t las deformaciones unitarias axiales y transversales respectivamente.

Where σ is the axial stress and ε_x and ε_t the unitary axial and transversal strain respectively.

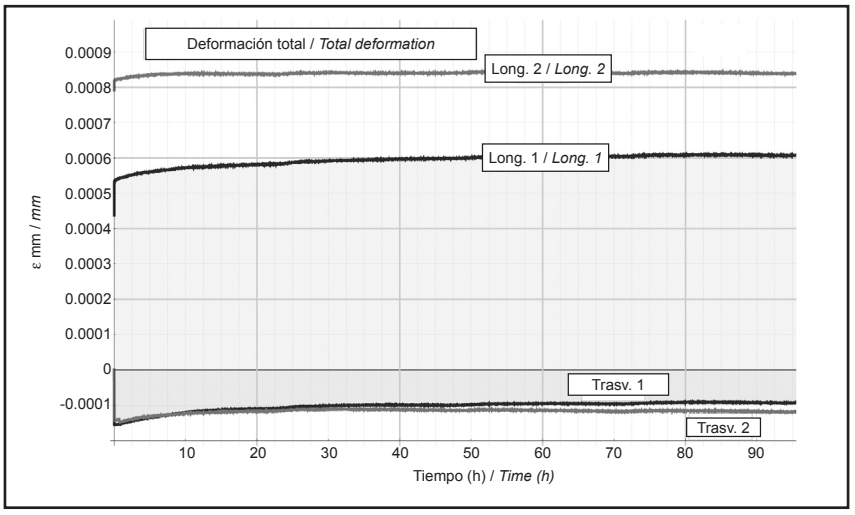


Figura 2. Deformación total de Probeta-1.
Figure 2. Total strain of Sample-1.

Los valores medios de Er y ν son 24,46±1,43 GPa y 0,21±0,01 respectivamente. Normalmente, en materiales pétreos como el hormigón, el módulo de elasticidad dinámico es 20, 30 y 40% más alto que el módulo estático para hormigones de baja, media y alta resistencia, respectivamente (30). Sin embargo, para la roca débil estudiada, el módulo dinámico es sólo un 8,2% mayor que el módulo estático.

The average values of Er and ν are 24.46±1.43 GPa and 0.21±0.01 respectively. Usually, on stony materials such as concrete, the dynamic modulus of elasticity is 20, 30 and 40% higher than the static modulus for low, medium and high strength concretes, respectively (30). However for the studied low strength rock, dynamic modulus is only 8.2% higher than the static modulus.

4. MODELOS (AJUSTE ANALÍTICO)

4.1. Modelo CEB-FIP

El código modelo CEB-FIP (13) permite cuantificar la fluencia lenta del hormigón. La función de fluencia (∅) definida en el código, una vez sintetizada la información contenida en sus diversas secciones, puede ser escrita como en la ecuación [4].

4. MODELLING (ANALYTICAL FITTING MODELS)

4.1. CEB-FIP Model

The CEB-FIP model code (13) allows quantifying concrete creep. The creep function (∅) defined in the CEB-FIP code, once synthesized the information contained in its sections, can be written as in equation [4].

$$\phi(t,t_0,RH,h)=\left(1+\frac{1-\frac{RH}{100}}{0.1+h^{\frac{1}{3}}}\left(\frac{35}{f28}\right)^{0.7}\right)\left(\frac{35}{f28}\right)^{0.2}\left(\frac{16.8}{f28^{\frac{1}{2}}}\right)\frac{1}{0.1+t_0{}^{0.2}}\times$$

$$\times\left(\frac{t-t_0}{1.5h\left(1+\left(\frac{1.2RH}{100}\right)^{18}\right)+250\left(\frac{35}{f28}\right)^{0.5}+(t-t_0)}\right)^{0.3} \qquad [4]$$

Donde:

- t_0 es la edad a la carga,
- RH/100 es la humedad relativa ambiental en % (100% si el hormigón no puede intercambiar humedad con el medio).

Where:

- *t_0 is the age at loading,*
- *RH/100 is the ambient relative humidity % (100% if the concrete cannot exchange humidity with the environment)*

- h es el factor de forma-dimensiones en mm (2 x Área / Perímetro).
- f28 es la Resistencia a compresión uniaxial a 28 días.

De esta forma, la fluencia (∅) viene dada por la ecuación [5]:

- *h is the sample form-dimensions factor in mm (2 x Area / Exposed Perimeter)*
- *f28 is the uniaxial compressive strength at 28 days*

So, the creep strain (∅) is given by equation [5]:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_{t0}}{E_{28}} \phi\,(t,t0,RH,h) \qquad [5]$$

Donde:

- σ_{t0} es la tensión constante aplicada,
- E_{28} es el modulo de Young a los 28 días.

Where:

- σ_{t0} *is the applied constant stress,*
- E_{28} *is the Young´s modulus at 28 days.*

Con el fin de aplicar el modelo de CEB-FIP a un material rocoso se consideró t_0 =10.000 días. De ese modo la roca se asemeja a un hormigón muy antiguo, en el que las características mecánicas no varían con el tiempo en ausencia de otras variables. La elección de 10.000 días es arbitraria, aunque se asume que a esta edad el hormigón considerado ha alcanzado el 98,9% de su resistencia a compresión y el 99,5% del módulo de elasticidad, con respecto a los máximos esperables según los modelos contemplados en el código CEB-FIP. Para la aplicación del modelo CEB-FIP se ha seleccionado un hormigón con una resistencia a compresión uniaxial similar a la de la roca (hormigón tipo H01). Sus características se resumen en la Tabla 2. Estas características se han obtenido usando un ajuste por mínimos cuadrados, de modo que la fluencia del hormigón a lo largo de las primeras 96 horas, de acuerdo con el modelo, se adaptara a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio con la roca estudiada.

In order to apply the CEB-FIP model to a rock material it was considered t_0 =10000 days. Thereby the rock resembles a very old concrete, in which mechanical characteristics do not vary over time in the absence of other variables. The 10000 days choice is arbitrary: at this age the considered concrete has reached 98.9% of its compression resistance and 99.5% of elasticity modulus with respect to the maximum values expected according to the model code CEB-FIP. A concrete with a similar uniaxial compressive strength than that of the studied rock has been selected for applying the CEB-FIP model (i.e. a concrete H01 type). The characteristics of the concrete are summarized in Table 2. These features of the model are set, using a least squares adjustment, so that the creep of the concrete along the first 96 hours, according to the model, fits the experimental results obtained in the laboratory for the studied rock.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Tabla 2 / *Table 2*
Hormigón H01 (CEB-FIP 2010).
H01 concrete (CEB-FIP 2010).

Resistencia a compresión uniaxial-28 días / *Uniaxial compressive strenght -28 days*	35 MPa
Resistencia a compresión uniaxial-10.000 días (CEB) / *Uniaxial compressive strength- 10000 days (CEB)*	42 MPa
Módulo de Young-28 días (CEB) / *Young´s modulus-28 days (CEB)*	29.38 GPa
Módulo de Young-10.000 días (CEB) / *Young´s modulus-10000 days (CEB)*	32.30 GPa
Cemento 52.5 R / *Cement 52.5 R*	S=0.20
Árido calizo / *Limestone aggregate*	a=0.9

La Figura 3 muestra la deformación por fluencia del hormigón H01 previamente definido (linea gris oscura) y los datos obtenidos de la prueba de la muestra de roca 01 (gris clara).

Figure 3 shows the creep deformation of the H01 concrete previously defined (dark grey line) and the data obtained from the test of rock sample 01 (light grey curve).

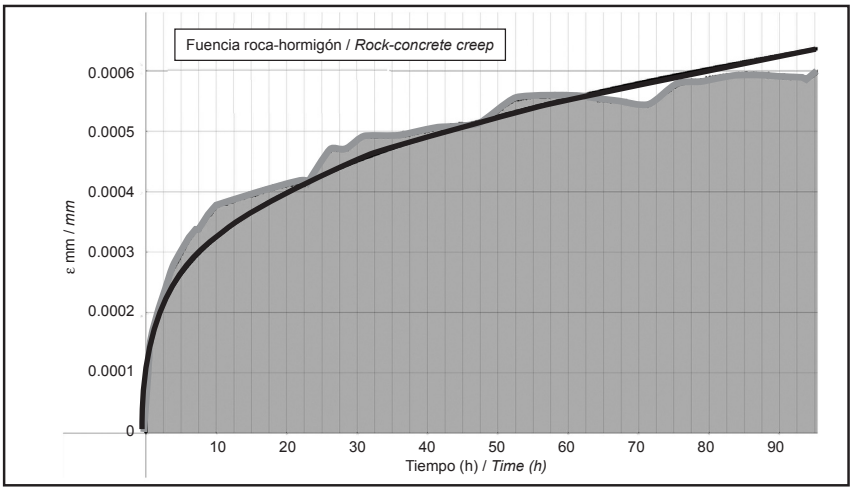


Figura 3. Curva de fluencia del hormigón H01 (gris oscuro) y la roca ensayada (gris claro).
Figure 3. Creep curves of the H01 concrete (dark grey) and the tested rock (light grey).

4.2. Modelo reológico

También se ha utilizado en este trabajo un modelo reológico de cuatro celdas de Kelvin, con el fin de reproducir el comportamiento en fluencia de la roca estudiada. Este modelo reológico se ha ajustado a los parámetros del modelo CEB-FIB a fin de reproducir el comportamiento de la función previamente definida [5] durante un periodo de carga de 10.000 días de la siguiente forma: En primer lugar la ecuación [5] se ha discretizado con el fin de tratarla como una Tabla de datos tiempo-deformación, en segundo lugar se ha ajustado por mínimos cuadrados la función que representa el comportamiento del modelo reológico a estos datos, y como consecuencia de ello se han obtenido los parámetros del modelo (E_i y η_j). La Figura 4 muestra el modelo propuesto. Las celdas de Maxwell, que describen la fase viscoplástica, no se han considerado porque en este trabajo (y en CEB-FIP) sólo se estudia la componente de fluencia primaria o viscoelástica de la deformación (la función hiperbólica de fluencia dada en el código modelo tiende asintóticamente a un máximo a tiempo infinito lo que indica que estamos en fluencia primaria, con deformaciones a velocidad continuamente decreciente. Los ensayos de compresión y fluencia que hemos realizado, mantienen las tensiones en el rango elástico del material en todo momento).

4.2. Rheological model

A four Kelvin cells rheological model has been also used in this work in order to reproduce the creep behaviour of the studied rock. This rheological model has been fitted to the CEB-FIB model parameters in order to reproduce the behaviour of the previously defined function [5] during a load period of 10000 days as follows: Firstly [5] has been discretized in order to be considered as a time-strain data series; secondly a least-square adjustment of the function that represents the behaviour of the rheological model has been performed and as a consequence the parameters of the model (E_i and η_j) have been computed. Figure 4 shows the proposed model. Notice that the Maxwell cells, that describe the viscoplastic phase, have not been considered because in this work (and in the CEB-FIP model code) only the primary or viscoelastic creep component of the deformation is being studied (the creep hyperbolic-function given in the model code asymptotically approaches a maximum at infinite time indicating that we are in primary creep, at strain speed continuously decreasing (uniaxial compressive strength and creep tests in this research, kept stress in the elastic range of the material at all times).

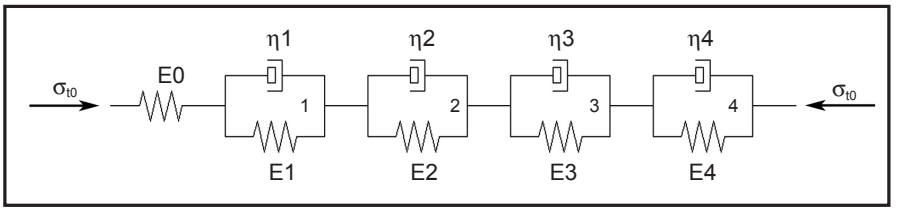


Figura 4. Modelo reológico.
Figure 4. Rheological model.

La deformación unitaria (ε) del modelo anterior se obtiene de la ecuación [6]:

The strain (ε) of the previously mentioned model is given by equation [6]:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_{t0}}{E_0} + \frac{\sigma_{t0}}{E_1}\left(1 - e^{-\frac{E1}{\eta 1}t}\right) + \frac{\sigma_{t0}}{E2}\left(1 - e^{-\frac{E2}{\eta 2}t}\right) + \frac{\sigma_{t0}}{E3}\left(1 - e^{-\frac{E3}{\eta 3}t}\right) + \frac{\sigma_{t0}}{E4}\left(1 - e^{-\frac{E4}{\eta 4}t}\right) \quad [6]$$

Donde:

- σ_{t0} es la tensión constante aplicada.
- E_i son los módulos de Young de los diferentes resortes del modelo.
- η_i son las viscosidades de los diferentes amortiguadores del modelo.

Where:

- σ_{t0} *is the applied constant stress.*
- E_i *are the Young´s modulus of the different model springs.*
- η_i *are the viscosities of the different model dampers.*

La elección del número de celdas en el modelo de Kelvin está determinada por la precisión requerida para el ajuste CEB-FIB/Modelo reológico. En este caso, el coeficiente de determinación es de R_2 = 0,99. Para reproducir estas deformaciones a lo largo del tiempo con la precisión requerida, se ha utilizado un modelo reológico clásico (resortes y amortiguadores), compuesto por cuatro celdas de Kelvin (1 a 4 en Figura 4), [6]. Los parámetros de ajuste para el modelo reológico se muestran en la Tabla 3.

Note that the choice of the number of cells in the Kelvin model is determined by the required accuracy for the CEB-FIB/Rheological model fit. In this case, the coefficient of determination is R_2 = 0.99. In order to assess the evolution of deformation with the required accuracy, a classical rheological model (springs and dampers) composed of four Kelvin cells (1 to 4 in Figure 4), [6] has been used. The parameters fitted to the rheological model are shown in Table 3.

Table 3 / *Tabla 3*
Parámetros del modelo reológico [6].
Parameters of the rheological model [6].

Parámetro / *Parameter*	Valor (GPa) / *Value (GPa)*	Parámetro / *Parameter*	Valor (GPa.s) / *Value (GPa.s)*
E0	1.0032E+03	-	-
E1	8.2256E+02	η1	1.3531E+02
E2	2.6989E+02	η2	2.1276E+03
E3	1.4497E+02	η3	3.5180E+03
E4	2.3768E+02	η4	6.2413E+05

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

5. DISCUSIÓN

La Figura 5 muestra la deformación en el tiempo para el modelo reológico (abajo, [6]) y la del hormigón de referencia acuerdo a CEB-FIP (arriba, [5]) para el periodo ensayado de cuatro días. En la Figura 6 los mismos parámetros para un periodo de 10.000 días.

La Figura 7 muestra el gráfico del modelo reológico y los datos experimentales obtenidos en las pruebas para la muestra-1.

Considerando los resultados obtenidos con el modelo CEB-FIP y el modelo reológico, se ha propuesto una ecuación simplificada [7] para estimar el comportamiento en fluencia (ε) de esta roca:

5. DISCUSSION

Figure 5 shows the creep time-series of the rheological model (below, [6]) and the reference concrete according CEB-FIP (arrives, [5]) for the tested period of four days. In Figure 6 the same parameters for a period of 10000 days are also plotted.

Figure 7 shows the plot of the rheological model overlaid to the experimental data obtained in the tests for sample-1.

Considering the results obtained with CEB-FIP model and the rheological model, a simplified equation [7] has been proposed for estimating the creep behaviour (ε) of the rock:

$$e\,(t, h) = \frac{\sigma_{t0}}{E_r}\left(\frac{1}{q_u}\right)^{0.7}\left(\frac{519{,}615\ t}{t + 1707.825\left(\frac{1}{q_u}\right)^{0.5} + 41.435\ h}\right)^{0.3} \quad [7]$$

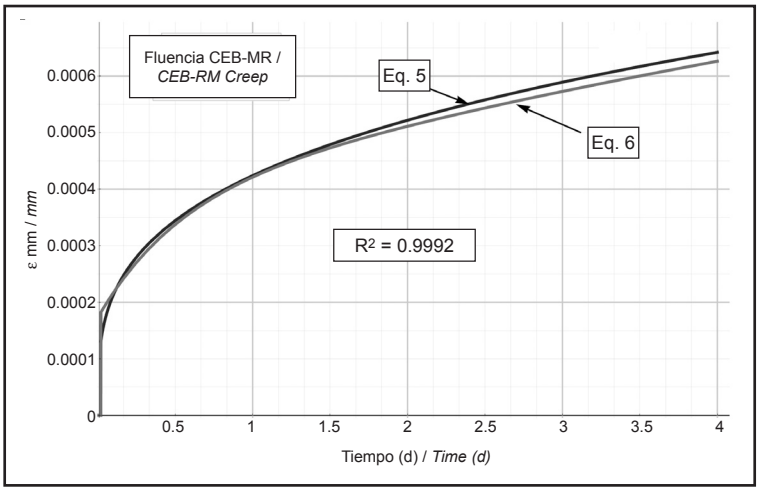


Figura 5. Modelos de fluencia del hormigón (arriba) y reológico (abajo).
Figure 5. Concrete (above) and rheological (below) creep models.

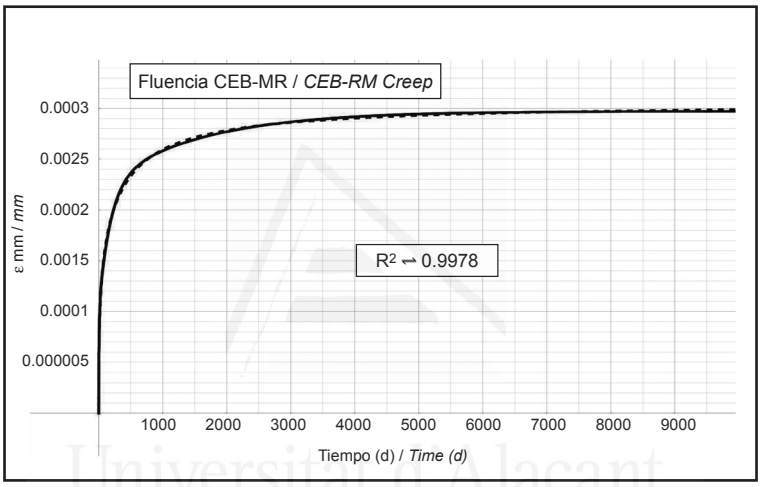


Figura 6. Modelos de fluencia del hormigón (curva discontínua) y reológico (curva contínua).
Figure 6. Concrete (dashed curve) and rheological (continuous curve) creep models.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

donde:

- σ_{t0} es la tensión constante aplicada (MPa)
- E_r es el módulo de Young de la roca (MPa),
- h es el factor de forma de la pieza en mm (2 x Área / Perímetro),
- y q_u es la Resistencia a compresión uniaxial de la roca (MPa)

La Figura 8 muestra el modelo CEB-FIB ajustado a los datos observados (arriba contínua) y la deformación calculada de acuerdo con la [7] (abajo discontínua) para los valores de q_u = 37 MPa *y* E_r = 25 GPa, que corresponden a una roca con características mecánicas similares a la estudiada, para un período de 4 días.

El modelo de fluencia propuesto en base a las propiedades mecánicas de las rocas [7], proporciona una buena aproximación al comportamiento de fluencia de la roca estudiada, en el período indicado. Los resultados muestran

where:

- σ_{t0} *is the applied constant stress (MPa)*
- E_r *is the Young´s modulus of the rock (MPa),*
- *h is the form factor, specimen dimensions in mm (2 x Area / Exposed Perimeter),*
- *and* q_u *is the uniaxial compressive strength of the rock (MPa)*

Figure 8 shows the CEB-FIB model fitted to the observed data (arrives continuous) and the strain computed according to [7] (below discontínua) for values of q_u *= 37 MPa and* E_r *= 25 GPa, that correspond to a rock with mechanical characteristics similar to the one studied, for a period of 4 days.*

Notice that the proposed rock creep model based on the rock mechanical properties [7] provides a good approximation to the creep behaviour of the studied rock, in the studied period. The results indicate that, although 96

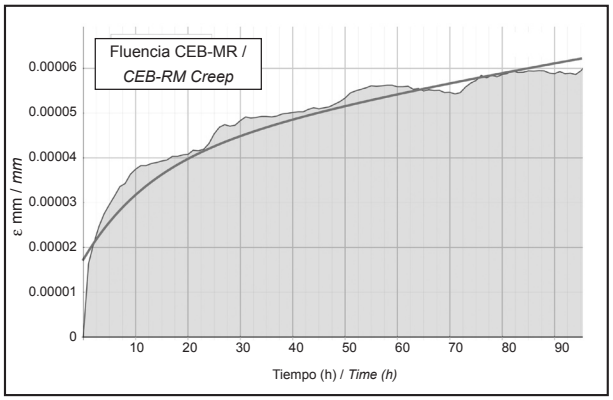


Figura 7. Modelo reológico (negro) y datos experimentales (gris).
Figure 7. Rheological model (black curve) and experimental data (grey curve).

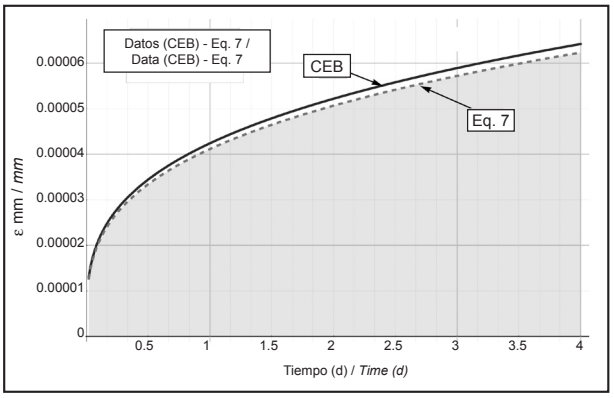


Figura 8. Modelo CEB-FIB ajustado a los datos experimentales (línea continua) y fluencia estimada con la [7] (punteada).
Figure 8. CEB-FIB model fitted to the experimental data (solid curve) and creep estimated through [7] (dashed curve).

que aunque a 96 horas la deformación de la roca es de sólo 60x10–6 mm/mm, según el modelo esto representa únicamente un 17% de la deformación por fluencia a tiempo infinito. Esto resalta la necesidad de proponer modelos precisos para predecir el comportamiento de las rocas a muy largo plazo. Por lo tanto, para confirmar la validez del modelo de fluencia propuesto en este trabajo se requieren más pruebas con diferentes condiciones de tensión. Por otra parte el modelo CEB-FIP, desarrollado experimentalmente para el hormigón, parece adecuado para ser aplicado a las rocas en el período estudiado.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se han realizado ensayos de fluencia con el fin de estudiar el comportamiento a largo plazo de una roca blanda. Se ha definido un hormigón de referencia (tipo H01) cuyo comportamiento en fluencia primaria de acuerdo con el código CEB-FIP se muestra similar al de la roca estudiada. Se ha observado que el modelo de fluencia para el hormigón de CEB-FIP, obtenido empíricamente y avalado por un considerable número de trabajos a lo largo de un amplio plazo de tiempo, puede ser aproximado mediante modelos reológicos clásicos basados en celdas de Kelvin. Las curvas de tiempo-deformación obtenidas con el modelo CEB-FIP [5] y con el modelo reológico propuesto [6] pueden ajustarse con el grado de precisión requerido. Además, en este trabajo se ha propuesto un modelo específico basado en el código CEB-FIP, adaptado a la roca débil estudiada [7] proporcionando una precisa aproximación al comportamiento real en fluencia de la roca ensayada en el período estudiado. Por último, señalar que el tipo de hormigón cuya curva de fluencia sigue de cerca el comportamiento de la roca ensayada, tiene una resistencia a compresión uniaxial en el momento de carga (es decir, el 98,9% de la máxima resistencia esperada) prácticamente igual a la obtenida en nuestros ensayos para la roca seca. Esto sugiere la existencia de algún paralelismo entre el

hours creep deformation of this soft rock is only 60x10–6 mm/mm, according to the model this value is only 17% of the very long-term creep deformation. This highlights the need to propose accurate models for predicting the very long-term behaviour of rocks. Therefore, the full validity of the creep model proposed on this work will require further testing with different stress conditions. Moreover, the CEB-FIP model originally and experimentally developed for concrete appears to be a suitable tool applied to rocks in the studied time period.

6. CONCLUSIONS

In this work creep tests have been performed in order to study the long-term behaviour of a soft rock. A pattern concrete (H01 type) whose primary creep behaviour computed according to CEB-FIP code has shown to exhibit similar creep behaviour than the tested rock has been defined. On the other hand, it was found that the creep model of CEB-FIP, empirically obtained by a considerable number of works supported over a wide time span, can be approximated by Kelvin-cells based rheological models. The results show that the time-deformation curves computed according to the CEB-FIP [5] and the proposed rheological [6] models can accurately be fitted. Furthermore, in this work a specific model based on CEB-FIP code adapted to the studied weak rock has been proposed [7] providing an accurate approximation to the real creep behaviour of the tested rock in the studied time period. Finally note that the type of concrete whose creep curve closely follows the tested rock behaviour, have a uniaxial compressive strength at the time of loading virtually equal to that obtained in the present tests for the dry rock (i.e. for the 98.9% of the maximum expected strength). This aspect suggests the existence of some parallelism between the creep behaviour of concrete and rock and as a consequence

comportamiento en fluencia del hormigón y el de la roca, y como consecuencia la posibilidad de intentar la adaptación del código CEB-FIP para modelizar la fluencia de las rocas más allá del período estudiado.

suggests the possibility of adapting the CEB-FIP model to reproduce the creep behaviour of rocks beyond the tested time period.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa U.T.E. FCC Construcción, S.A. y Enrique Ortiz e Hijos Contratistas de Obras, S.A el suministro de las muestras de roca de la excavación del túnel del TRAM. Este trabajo ha sido financiado por la Universidad de Alicante bajo los proyectos uausti11–11 y gre09–40 y por la Generalitat Valenciana bajo el proyecto gv/2011/044.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors want to thank the company U.T.E. FCC Construcción, S.A. y Enrique Ortiz e Hijos Contratistas de Obras, S.A for the provided rock samples from the TRAM tunnel excavation. This work has been funded by the Universidad de Alicante under the projects uausti11–11 and gre09–40 and by the Generalitat Valenciana under the project gv/2011/044.

BIBLIOGRAFÍA / *BIBLIOGRAFY*

(1) Weng, M.C.; Tsai, L.S.; Hsieh, Y.M.; Jeng, F.S.: "An associated elastic-viscoplastic constitutive model for sandstone involving shear-induced volumetric deformation" , *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 47, nº 8 (2010), pp. 1263-1273. 10.1016/j.ijrmms.2010.08.022.

(2) Guan, Z.; Jiang, Y.; Tanabashi, Y.: "Rheological parameter estimation for the prediction of long-term deformations in conventional tunnelling" , *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 24, nº 3 (2009), pp. 250-259. 10.1016/j.tust.2008.08.001.

(3) Nadimi, S.; Shahriar, K.; Sharifzadeh, M.; Moarefvand, P.: "Triaxial creep tests and back analysis of time-dependent behavior of Siah Bisheh cavern by 3-Dimensional Distinct Element Method" , *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 26, nº 1 (2011), pp. 155-162. 10.1016/j.tust.2010.09.002.

(4) Sterpi, D.; Gioda, G.: "Visco-Plastic Behaviour around Advancing Tunnels in Squeezing Rock" , *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 42, nº 2 (2009), pp. 319-339. 10.1007/s00603-007-0137-8.

(5) Shao, J.F.; Zhu, Q.Z.; Su, K.: "Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation" , C*omputers and Geotechnics*, vol. 30, nº 7 (2003), pp. 549-555. 10.1016/s0266-352x(03)00063-6.

(6) Zuan, C.: "Analysis of a microcrack model and constitutive equations for time-dependent dilatancy of rocks" , *Geophysical Journal International*, vol. 155, nº 2 (2003), pp. 601-608. 10.1046/j.1365-246X.2003.02067.x.

(7) Jandakaew, M.: "Stress-path dependency of rock salt" , *Rock Mechanics* (2007), pp. 171-188.

(8) Berest, P.; Blum, P.A.; Charpentier, J.P.; Gharbi, H.; Vales, F.: "Very slow creep tests on rock samples" , *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 42, nº 4 (2005), pp. 569-576. 10.1016/j.ijrmms.2005.02.003.

(9) Fuenkajorn, K.; Phueakphum, D.: "Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt" , *Engineering Geology*, vol. 112, nº 1-4 (2010), pp. 43-52. 10.1016/j.enggeo.2010.01.002.

(10) Fu, Z.; Guo, H.; Gao, Y.: "Creep damage characteristics of soft rock under disturbance loads" , *Journal of China University of Geosciences*, vol. 19, nº 3 (2008), pp. 292-297.

(11) Anzani, A.; Garavaglia, E.; Binda, L.: "Long-term damage of historic masonry: A probabilistic model" , *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, nº 2 (2009), pp. 713-724. 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.010.

(12) Damjanac, B.; Fairhurst, C.: "Evidence for a Long-Term Strength Threshold in Crystalline Rock" , *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 43, nº 5 (2010), pp. 513-531. 10.1007/s00603-010-0090-9.

(13) Afrouz, A.; Harvey, J.M.: "RHEOLOGY OF ROCKS WITHIN SOFT TO MEDIUM STRENGTH RANGE" , *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 11, nº 7 (1974), pp. 281-290. 10.1016/0148-9062(74)90230-7.

(14) Ma, L.-j.; Liu, X.-y.; Fang, Q.; Xu, H.-f.; Xia, H.-m.; Li, E.-b.; Yang, S.-g.; Li, W.-p.: "A New Elasto-Viscoplastic Damage Model Combined with the Generalized Hoek-Brown Failure Criterion for Bedded Rock Salt and its Application" , *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 46, nº 1 (2013), pp. 53-66. 10.1007/s00603-012-0256-8.

(15) P. Jongpradist, H.H.: "Influence of water content on and relationship between strength and creep behaviors of soft rock: experimental characterization" , *Rock Mechanics, Fuenkajorn & Phien-wej (eds)* (2007), pp. 80-92.

(16) Kate, J.M.; Gokhale, C.S.: "Influence of moisture on triaxial compression behaviour of soft sandstone" , *Geotechnics of Hard Soils - Soft Rocks* pp. 245-252., vol. 1, (1998).

(17) CEB/FIP: "Model Code 2010" , *Fib bulletins*, vol. 55-56 (2010).

(18) AENOR: "UNE-22950-1. Propiedades mecánicas de las rocas. Determinación de la Resistencia. Resistencia a la compresión uniaxial." , *Asociación Española de Normalización y Certificación* (1990).
(19) Martinez-Martinez, J.; Benavente, D.; Garcia-del-Cura, M.A.: "Spatial attenuation: The most sensitive ultrasonic parameter for detecting petrographic features and decay processes in carbonate rocks" , *Engineering Geology*, vol. 119, nº 3-4 (2011), pp. 84-95. 10.1016/j.enggeo.2011.02.002.
(20) Reyes, E.; Casati, M.J.; Gálvez, J.C.: "Study of the brickwork masonry cracking with a cohesive fracture model" , *Mater. Construcc.*, vol. 61, nº 303 (2011), pp. 431-449. 10.3989/mc.2010.57910.
(21) Fort, R.; Fernandez-Revuelta, B.; Varas, M.J.; de Buergo, M.A.; Taborda-Duarte, M.: "Influence of anisotropy on the durability of Madrid-region Cretaceous dolostone exposed to salt crystallization processes" , *Mater. Construcc.*, vol. 58, nº 289-90 (2008), pp. 161-177.
(22) Alemany, R.M.E.: "Alteration of granite stone used in building construction" , *Mater. Construcc.*, vol. 57, nº 288 (2007), pp. 77-88.
(23) Martin, J.D.: "Using XPowder: A software package for Powder X-Ray diffraction analysis." , D.L. GR 1001/04.ISBN 84-609-1497-6, (2004), pp. 105.
(24) Dunham, R.J.: "Classification of carbonate rocks according to depositional texture", *Memoirs American Association of Petroleum Geologists* (1962), pp. 108-121.
(25) Louis Cereceda, M.; del Cura, M.M.G.; Spairani, Y.; de Blas, D.: "The Civil Palaces in Gravina street, Alicante: building stones and salt weathering", *Mater. Construcc.*, vol. 51, nº 262 (2001), pp. 23-37.
(26) AENOR: "UNE-EN 1936: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total", Asociación Española de Normalización y Certificación (2007).
(27) Anon.: "Classification of rocks and soils for engineering geological mapping part I: Rock and soil materials" , *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, vol. 19, nº 1 (1979), pp. 364-371. 10.1007/bf02600503.
(28) Farmer, I.W.: "Engineering properties of rocks" , *E. and F. N. Spon Ltd.; London*, vol.; nº (1968),
(29) Anon.: "Classification of the strength of the rock matrix" , I*nternational Society for Rock Mechanics* (1978).
(30) Rodrigues, G.S.S.; Figueiredo, E.P.: "Static modulus of elasticity of concrete measured by the ultrasonic method" , *Mater. Construcc.*, vol. 53, nº 271-72 (2003), pp. 47-58.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2. Artículo segundo

Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Alarcon, J. C.: *"Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian´s calcarenite"*, Engineering Geology, Vol. 167, n. (2013), pp. 117-127. doi: 10.1016/j.enggeo.2013.10.012.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Engineering Geology 167 (2013) 117–127

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering Geology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enggeo

Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite

V. Brotóns *, R. Tomás, S. Ivorra, J.C. Alarcón

Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, P.O. Box 99, E- 03690 Alicante, Spain

ARTICLE INFO

Article history:
Received 16 January 2013
Received in revised form 30 July 2013
Accepted 15 October 2013
Available online 22 October 2013

Keywords:
Thermal effects
Uniaxial compressive strength
Elastic modulus
Fire
Calcarenite
Heritage buildings

ABSTRACT

This work discusses the results from tests which were performed in order to study the effect of high temperatures in the physical and mechanical properties of a calcarenite (San Julian's stone). Samples, previously heated at different temperatures (from 105 °C to 600 °C), were tested. Non-destructive tests (porosity and ultrasonic wave propagation) and destructive tests (uniaxial compressive strength and slake durability test) were performed over available samples. Furthermore, the tests were carried out under different conditions (i.e. air-cooled and water-cooled) in order to study the effect of the fire off method. The results show that uniaxial compressive strength and elastic parameters (i.e. elastic modulus and Poisson's ratio), decrease as the temperature increases for the tested range of temperatures. A reduction of the uniaxial compressive strength up to 35% and 50% is observed in air-cooled and water-cooled samples respectively when the samples are heated to 600 °C. Regarding the Young's modulus, a fall over 75% and 78% in air-cooled and water-cooled samples respectively is observed. Poisson's ratio also declines up to 44% and 68% with the temperature in air-cooled and water-cooled samples respectively. Slake durability index also exhibits a reduction with temperature. Other physical properties, closely related with the mechanical properties of the stone, are porosity, attenuation and propagation velocity of ultrasonic waves in the material. All exhibit considerable changes with temperature.
© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Contents

1. Introduction . . . 117
2. Previous works . . . 118
3. Samples and heating process . . . 118
   3.1. Rock description and samples preparation . . . 118
   3.2. Heating process . . . 119
4. Results: relationship between stone properties and temperature . . . 120
   4.1. Porosity . . . 120
   4.2. Ultrasonic wave attenuation . . . 120
   4.3. Young's modulus . . . 121
   4.4. Poisson's ratio . . . 122
   4.5. Uniaxial compressive strength . . . 122
   4.6. Durability (Sehudes index) . . . 123
5. Discussion . . . 123
6. Conclusions . . . 125
Acknowledgements . . . 126
References . . . 126

1. Introduction

Stone can be considered the most important building material throughout the history of architecture and civil works. Most historic buildings which form the cultural heritage of the cities are made of stone. However, although the stone is always perceived as an "eternal" material, it is well known that building stone undergoes many processes of deterioration. The San Julian's stone, studied in this paper, has been widely used in historic buildings from the city of Alicante (SE Spain). Recently, railway tunnels and cut-slopes have also been excavated in rock masses composed by San Julian's rock. Consequently, it is

* Corresponding author. Tel.: +34 965 903400.
E-mail address: vicente.brotons@ua.es (V. Brotóns).

0013-7952/$ – see front matter © 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.
http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.012

important to know the behaviour of this kind of rock against different aggressive agents. This study is focused on the effect of high temperatures (as achievable catastrophic fires) on some physical and mechanical properties of the San Julian's stone.

Fire produces physical and chemical changes, from certain temperatures, in the internal structure of the rocks. Rocks are composed of minerals, bounding matrix, cracks and pores. The geometry and density of the cracks and pores are the main controlling parameters for the physical properties of rocks (Yavuz et al., 2010). The temperature induces micro cracks in the material due to the different natures of the constituent minerals (intergranular) (Jansen et al., 1993) or within grains (intragranular). The intragranular microcracks can occur when any of the mineral undergoes a qualitative change or phase transition (such as the case of α/β phase transition in quartz) (Glover et al., 1995). The intergranular cracks are due to the different expansion coefficients of the component minerals, causing a differential expansion thereof with temperature, generating internal stresses resulting in the creation of cracks in the transition phase between components (Jansen et al., 1993). When temperature changes occur in a very short time, intergranular cracks occur by another different process than the previous ones: high temperature gradients in the material. These temperature gradients act by amplifying the differential dilation effects by different coefficients of expansion (Jansen et al., 1993). At 575 °C, α-quartz becomes β-modification, which causes volumetric increase, and thermal crack opening. Nevertheless this porosity increases, or decrease in strength, are of minor importance for quartz-rich sandstones (Hajpal, 2002). Due to the existence of open porosity and the presence of a calcitic matrix which undergoes a parallel calcining process, this micro-strain is absorbed by the matrix (Gomez-Heras et al., 2010). In contrast carbonate and clay containing sandstones show important changes in mineral composition and in physical properties even at lower temperatures (Hajpal, 2002). At temperatures above 250–300 °C, colour changes in sandstones correspond with the dehydration of iron compounds. Brown or buff coloured sandstone, changes colour to reddish brown but the change may not be apparent until the stone has been heated to temperatures above 400 °C (Chakrabarti et al., 1996).

The main aim of this paper is to study the influence of temperature and the cooling method on physical and mechanical properties of San Julian's stone, a porous calcarenite widely used locally as building material in the past, through laboratory tests. For this purpose uniaxial compressive strength, slake durability, porosity and ultrasonic wave propagation tests have been performed for 55 rock samples following standard procedures before and after heating at different temperatures and cooling under different conditions.

2. Previous works

Most studies on the effects of fire or heating in sandstones refer to chemical changes, such as changes in colour and mineralogical composition (Chakrabarti et al., 1996; Hajpal, 2002; Hajpal and Torok, 2004; Gomez-Heras et al., 2008, 2010). In connection with physical changes, porosity, bulk density and propagation velocity of the ultrasonic waves are also frequently analysed (Yavuz et al., 2010). Hong et al. (2012) performed an interesting compilation of physical changes produced by temperature on sandstones from other scientific works, stating next general conclusions: density does not vary substantially below 500 °C, porosity increases with temperature especially from 300 °C and P-wave velocity decreases linearly with temperature, from 200 °C.

A key feature for the use of stone as a building material is the uniaxial compressive strength. The variation of this parameter has been systematically studied for engineering applications such as geothermal energy systems or nuclear waste disposal. However, for these cases of study, the tests were performed at the target temperature (without cooling) rather than after a cooling process. The works carried out to consider the temperature influence on non-crystalline sedimentary rocks show quite different results depending on the type of studied rock. Wu et al. (2005) studied various types of sandstones, detecting minimum strength decreases until 400 °C, and a sharp drop between this temperature and 600 °C, where strength was just under 60% of the initial value. Rao et al. (2007) tested eight sandstone samples and observed a strong initial increase of resistance to 250 °C, and then a decline to 300 °C, however at this temperature, resistance is 138% higher than the initial. Zhang et al. (1993, 2009) found that, for their studied sandstones, the strength quickly decreases with temperature, to reach 60% of the initial at 200 °C, then rises until it reaches 120% of the initial strength at 500 °C, it keeps at 600 °C, and then decreases close to 70% to the maximum tested temperature of 800 °C. Ranjith et al. (2012) tested sandstones until 950 °C obtaining different results than in other works, highlighting the significant increase in strength with temperature, reaching 180% of the initial strength at 600 °C, then lowering until the maximum test temperature is reached, remaining above the initial strength. Koca et al. (2006) studied nine samples of intact marble, under different temperatures observing important descents of the rock strength. These authors also tested five rock samples obtained from building elements previously exposed to fire (subjected to an estimated temperature of 500 °C) using temperatures from room temperature to 300 °C which caused a very high elastic modulus decrease beyond 200 °C. A noteworthy aspect in the work from Koca et al. (2006) is that the uniaxial compressive strength of the material exposed to 500 °C and then cooled to room temperature exhibits very similar uniaxial compressive strength values than the intact material tested at 500 °C. Ferrero and Marini (2001) tested 15 samples of two types of marble which were previously heated to temperatures up to 600 °C and later cooled applying a very low gradient of temperature. These authors noted that the compressive strength was not affected after a single heating cycle, whilst the modulus of elasticity decreased sharply up to 50% of the original value in the first type of rock and up to 35% in the second one. Fig. 1 graphically summarizes the previously described results.

San Julian's stone exhibits a clear decrease of the elastic modulus in agreement to Wu et al. results (2005). However, other authors detected some initial hardening at different temperatures. Rao et al. (2007) registered a slight hardening, until 250 °C and a decline at 300 °C. Zhang et al. (1993, 2009) noticed that the modulus remains almost constant until 600 °C, then falling to 65% at 800 °C. Ranjith et al. (2012) recognized a tightening until 400 °C reaching almost 40%, subsequently continuously decreasing up to 35% at 950 °C. Fig. 2 summarizes the variation of elastic modulus against temperature of the above mentioned works.

In most of the previously mentioned works (Koca et al., 2006; Rao et al., 2007; Zhang et al., 2009; Ranjith et al., 2012) the tests were performed at a target temperature (without cooling). Wu et al. (2005) performed the tests under and after high temperature, noting that the peak-value strength, elastic modulus and deformation modulus at high temperatures and after high temperatures gradually decreased exhibiting a general similar variation trend (cooling method is not specified). Ferrero and Marini (2001) used a very slow cooling process with a negative gradient of 0.23 °C/min. Koca et al. (2006) also tested at room temperature a sample previously exposed to fire at 500 °C.

3. Samples and heating process

3.1. Rock description and samples preparation

Block samples were taken from the Serra Grossa hill, located at the NE of the urban area of Alicante (SE of Spain). The specimens studied in this paper were obtained from rock blocks collected from the dump of a railway tunnel under construction. The rock blocks were picked up just after the excavation and transported to the laboratory, where the samples were extracted by means of a drill. The orientation of stratification planes in the blocks was taken into account when drilling

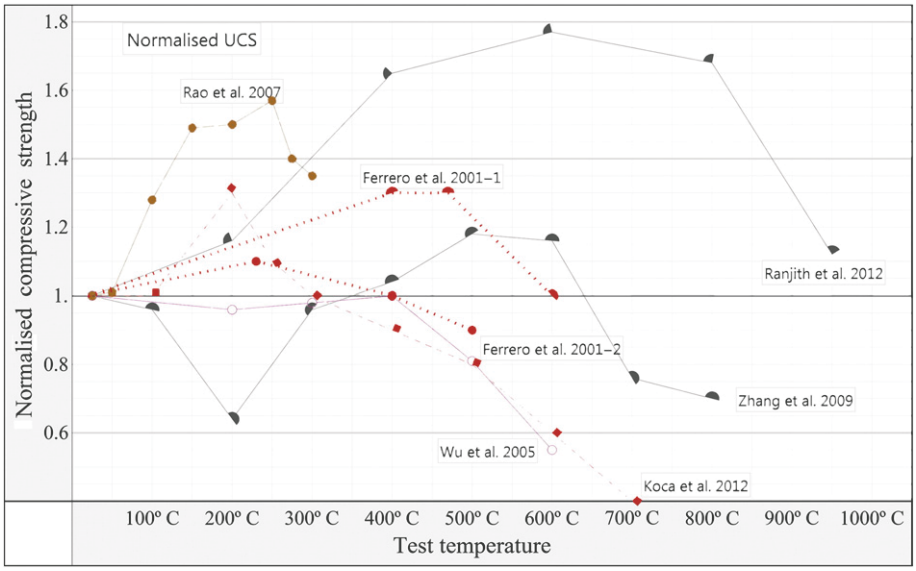


Fig. 1. Normalized uniaxial compressive strength after heat treatment.

the rocks in order to avoid potential anisotropy influence, so that these stratification planes are perpendicular to the cylinder axis in the cylindrical samples obtained. Later non-destructive tests (i.e. P-wave velocity, ultrasonic S-wave velocity and spatial attenuation) performed in three orthogonal axes on cubic samples of rock of different size provided very similar results, indicating that the rock exhibits a clear isotropic behaviour.

An X-ray diffraction analysis was performed and interpreted by Brotons et al. (in press) using the XPowder software package (Martin, 2004). The qualitative search-matching procedure was based on the ICDD-PDF2 database. The main components derived from the analysis are: calcite (70%), iron-rich dolomite (25%), quartz (5%) and traces of clay minerals (illite). The studied rock corresponds to a very porous biocalcarenite (a Grainstone according to Dunham, 1962). From a textural point of view, this rock presents abundant allochemicals, generally smaller than 2 mm size, although bands of various grain sizes have been found. The rock presents a wide variety of fossil bryozoans, foraminifera, red algae, and echinoderms fragments. The ortochemical fraction mainly corresponds to micrite (Sánchez, 2005). The studied rock presents medium to high values of open porosity ($19.7 \pm 4.1\%$) and a dry unit weight of $21.10 \pm 0.70\ kN/m^3$ (according to Spanish standard (AENOR, 2007)).

For this study, 55 cylindrical samples of 52 mm in diameter and 125 mm long were obtained. The choice of 2.5 slenderness ratio was performed to ensure their suitability for the tests to be conducted according to relevant standards (ISRM, 1979). The bases of the cylinders were treated to ensure flatness and perpendicularity relative to the guideline. Table 1 shows the main physical and mechanical properties of the intact rock samples determined at 105 °C. This initial heating was performed to remove all moisture content.

3.2. Heating process

Rock sample heating process was performed in an oven from 105 °C in order to reach the target temperature in 60 min. Once target temperatures of 200, 300, 400, 500 and 600 °C were reached for the different samples, the temperatures were kept for 1 h and then cooled in two different ways (Table 2): air cooled at laboratory temperature and by water immersion at laboratory temperature in a 10 l vessel during 5 min in order to study the influence of the cooling method in

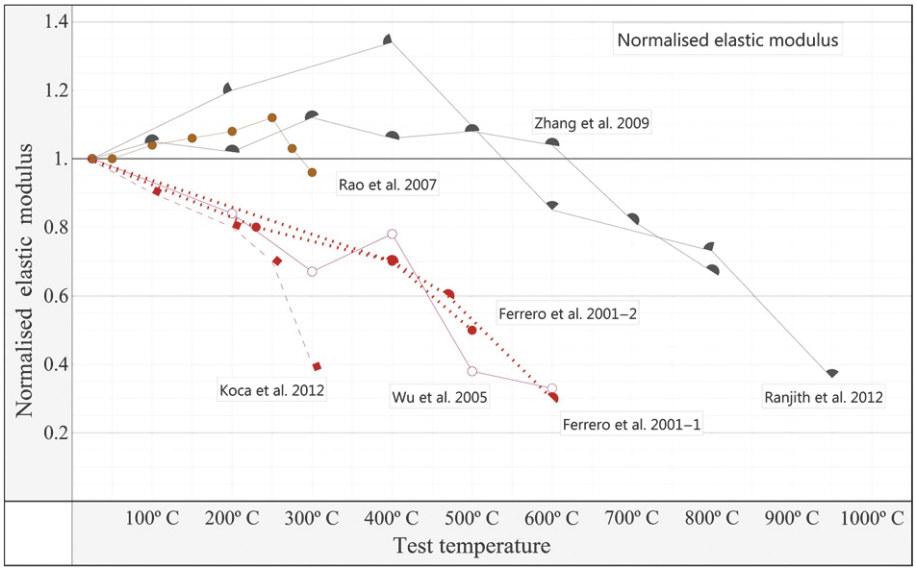


Fig. 2. Normalized elastic modulus after heat treatment.

the rock properties. Note that samples heated at 400, 500 and 600 °C were cooled in the furnace to 300 °C with a gradient of 0.5 °C/min and then introduced in a dry atmosphere at room temperature. Finally, the samples were kept dry until the completion of subsequent tests.

4. Results: relationship between stone properties and temperature

Laboratory tests conducted on rock samples heated at different temperatures are: porosity (AENOR, 2007), velocity and attenuation of ultrasonic waves (AENOR, 2005), breaking load and strain–stress relationship (ISRM, 1979) and durability index (ISRM, 1977). From these variables next parameters were obtained: Porosity, ultrasonic wave attenuation, Young's modulus (from ultrasonic waves and mechanical test), Poisson's ratio (from ultrasonic waves and mechanical test), uniaxial compressive strength (from mechanical test), and Sehudes index (from slake durability test).

The tests were firstly performed over samples heated to 105 °C in order to eliminate water content. These samples were adopted as target specimens and provided the reference values and their respective experimental dispersions. A total number of 55 samples which were previously classified into 6 groups were tested. For each group, the previously listed properties were studied before and after the heating process, except for destructive mechanical tests. Next subsections show the obtained results for the different tested rock samples.

4.1. Porosity

Porosity is one of the most significant properties in porous rocks, due to its importance in the behaviour of rocks from the engineering standpoint. It determines the water absorption capacity and thus deterioration sensitivity (e.g. frost resistance, efflorescence, aggressive chemical agent's penetration). In this work, open porosity was measured using weights (dry, immersed, saturated) and sample volume traditional techniques (AENOR, 2007) and total porosity was computed from dry density and the unit weight of solids of the rock (AENOR, 2007). Unit weight of solids was obtained by the pycnometers method according to UNE-EN1936 (AENOR, 2007) using small pieces obtained from the cutting of the ends of the regular rock samples. The studied calcarenite is a high porosity rock, being almost entirely open porosity. For the reasons stated, open and total porosities exhibit similar behaviours.

The average open porosity according to UNE-EN 1936: 2006 (AENOR, 2007) of the 55 studied samples is 19.7 ± 4.1%, representing about 90% of total porosity (22.1 ± 2.5%). Fig. 3 shows the percentage of increase of the porosity versus the target heating temperature. Note that the water-cooled samples show a wide dispersion and small increments corresponding to high temperatures. However, air-cooled samples exhibit a low initial increase, 2% until 300 °C, and then a linear ascent until 14% (open porosity at 600 °C). These results shows that until 300 °C no significant structural changes occur and they are probably limited to the extent of existing micro-cracks, without creating new connections between pores.

Table 1
Physical and mechanical properties (mean ± standard deviation) of San Julian's stone. The number of tested samples is 55 excepting for those properties labelled with asterisk (*) which have been obtained performing 5 destructive tests.

Parameter		Value
Dry unit weight, ρ_d (kN/m^3)		21.10 ± 0.70
Saturated unit weight, ρ_{sat} (kN/m^3)		23.10 ± 0.30
Water absorption saturated (%)		9.40 ± 0.02
Unit weight of solids, γ_s (kN/m^3)		27.08 ± 0.14
Open porosity, n (%)		19.72 ± 4.08
Total porosity, n (%)		22.09 ± 2.53
Spatial attenuation, α_s (dB/cm)		3.70 ± 0.53
P-waves velocity, V_p (km/s)		3.96 ± 0.18
S-waves velocity, V_s (km/s)		2.29 ± 0.13
Young's modulus, E (GPa)	From ultrasonic waves	27.7 ± 3.47
	From mechanical tests*	21.6 ± 2.25
Poisson's ratio, ν	From ultrasonic waves	0.25 ± 0.03
	From mechanical tests*	0.31 ± 0.08
Uniaxial compressive strength, σ_{ci} (MPa)*		31.5 ± 6.01
Slake Durability Test, SDT	I_{d1} (%)	99.13 ± 0.04
	I_{d2} (%)	98.54 ± 0.29

Table 2
Number of samples tested. Note that the 55 samples were previously heated at 105 °C and air cooled for performing non-destructive tests and obtaining reference values. Uniaxial compressive strength and mechanical elastic modulus (destructive test) was only obtained for 5 of these samples in order to determine reference values. (*) Reference temperature.

Temperature	Air cooled	Water cooled	
(°C)	Number of samples	Number of samples	Total
105 (*)	5	–	5
200	5	5	10
300	5	5	10
400	5	5	10
500	5	5	10
600	5	5	10
Total	30	25	55

4.2. Ultrasonic wave attenuation

Ultrasonic waves were measured using a signal emitting-receiving equipment (Panametrics-NDT 5058PR) coupled to an oscilloscope (TDS 3012B-Tektronix), which acquires and digitalizes waveforms allowing them to be displayed, manipulated and stored.

Two different kinds of Parametric transducers were used: a non-polarized transducer couple and a S-polarized transducer couple. The first couple was used in order to acquire the ultrasonic waveform and thereafter to study and quantify the signal in time-domain. The second ultrasonic transducer couple was employed exclusively to measure the S-wave propagation velocity. A visco-elastic couplant was used to achieve good coupling between the transducer and the sample. The frequency of both transducer couples is centred in 1 MHz.

Three different ultrasonic parameters were computed from each registered waveform: ultrasonic P-wave velocity (V_p); ultrasonic S-wave velocity (V_s); and spatial attenuation (α_s). P-wave velocity (V_p) is the most widely-used ultrasonic parameter and it was determined from the ratio of the length of the specimen to the transit time of the pulse. The obtained values were 3.96 ± 0.18 km/s and 2.29 ± 0.13 km/s for the V_p and V_s velocities respectively which correspond to a "Medium" velocity range following the International Association of Engineering Geology classification (Anon., 1979).

Spatial attenuation (α_s) quantifies the energy lost during wave propagation through a material. This quantification was performed by comparing the amplitude of the signal emitted (A_e) by the transmitter sensor and the amplitude recorded (A_{mx}) in the signal received by the receptor sensor (Martinez-Martinez et al., 2011). Moreover, spatial attenuation was normalized with respect to the distance between transmitter and receptor sensors (L). αs was then calculated according to next expression:

$$\alpha_s(\mathrm{dB/cm}) = 20(\log[(A_e/A_{mx})])/L. \quad (1)$$

Fig. 4 shows the attenuation in the ultrasound propagation before and after heat treatment. The heating process increases the attenuation in a way that cannot be clearly determined as linear (Figure 5). No differences were found between the samples water-cooled and air-cooled. The increase of the attenuation in the heated specimens can exceed 40%.

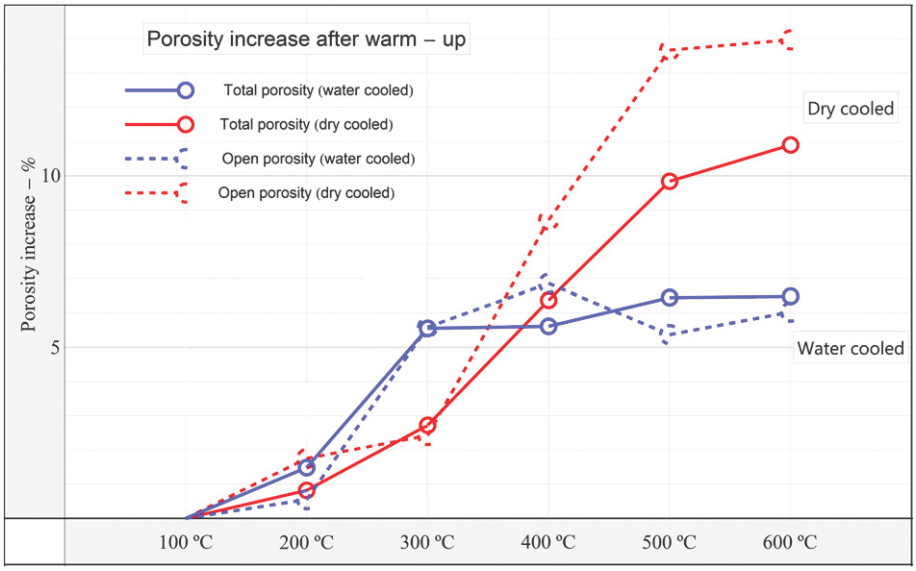


Fig. 3. Porosity variation after heat treatment.

4.3. Young's modulus

Two different methods have been used to determine the Young's modulus and Poisson's ratio: ultrasonic and mechanical methods.

The ultrasonic parameters, ultrasonic P-wave velocity (V_p) and ultrasonic S-wave velocity (V_s), have been used to compute the dynamic modulus of the specimens, Young's modulus (E_d) and Poisson's ratio (ν_d), according to Eqs. (2) and (3).

$$E_d = \rho_{bulk} v_p^{\,2}(1-2\nu_d)(1+\nu_d)/(1-\nu_d) \tag{2}$$

$$\nu_d = \left(v_p^{\,2}-2v_s^{\,2}\right)/2\left(v_p^{\,2}-v_s^{\,2}\right) \tag{3}$$

where ρ_{bulk} is the bulk density of the specimen.

Fig. 6 shows the Young's modulus obtained by the ultrasonic wave's propagation velocity, before and after the sample heat treatment for dry cooled samples. Note that the Young's modulus decreases dramatically with increasing temperature.

Note that the observed trend in Fig. 7 is approximately linear and shows that in the water-cooled samples, this decrease is greater than in the air-cooled samples (room temperature). Moreover the results obtained by both procedures exhibit a similar trend.

The lowering of Young's modulus in the water cooled samples is of the order of twice the lowering of modulus of the air-cooled samples at 200 °C (≈20% versus ≈10%). Differences between the values of this constant by the cooling method are gradually reduced with the increase of temperature, but the results achieved at 600 °C reach a 75% and 78% decrease for air-cooled and water-cooled samples respectively.

For the mechanical tests, an HBM Spider 8–600 Hz equipment was used jointly with HBM strain gauges (120 Ω, K = 2.1) and Catman v.5.0 analysis software. Longitudinal and transverse strain values were obtained for each loading cycle up to a maximum value when the applied load is equal to 40% of the sample ultimate load as specified by the suggested test method (ISRM, 1979) for the secant Young's modulus and corresponding Poisson's ratio. A press machine of 350 kN capacity was used for both compressive strength and elastic properties tests.

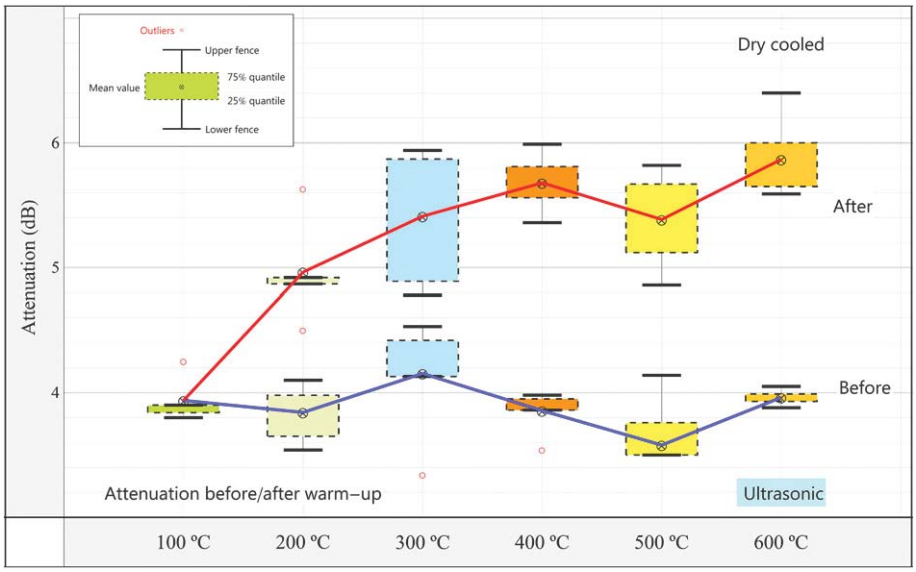


Fig. 4. Attenuation of ultrasonic waves before and after heat treatment.

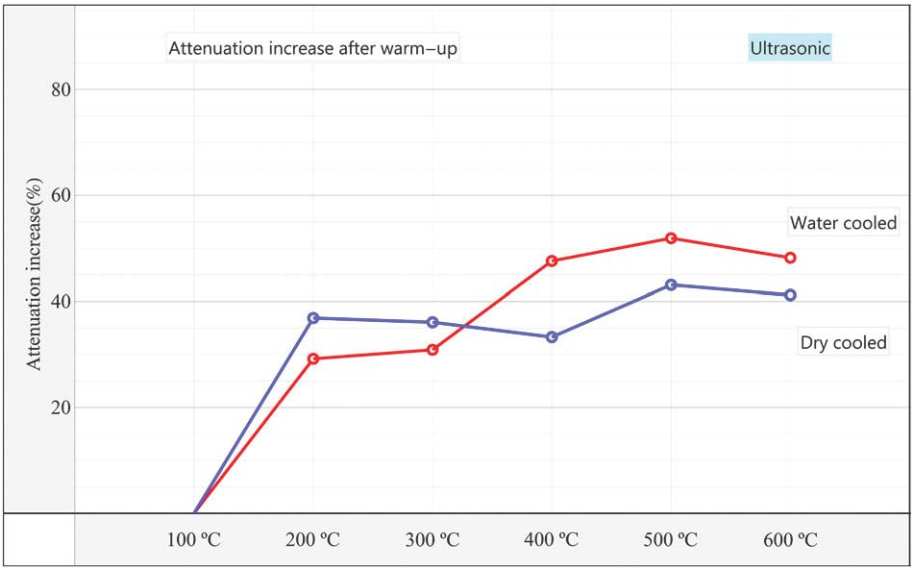


Fig. 5. Attenuation variation of ultrasonic waves after heat treatment.

Due to the destructive character of the mechanical tests, the elastic parameters obtained for the different temperatures have been only compared with the reference values corresponding to the samples heated to 105 °C. Fig. 8 shows the greatest Young's modulus reduction for each set of samples. The absolute values obtained by the static method are smaller than those obtained by dynamic methods (as usual), although trends are remarkably similar for the two measurement techniques (destructive and non-destructive). Young's modulus declines are about 35% (air-cooling) and 58% (water-cooling) for low temperatures and more than 85% (both) at 600 °C.

4.4. Poisson's ratio

Poisson's ratio values before and after the specimen heating obtained by ultrasonic propagation velocity tests are shown in Fig. 9. This parameter decreases inversely proportional to the temperature.

As in the previous case, the water-cooled sample Poisson's ratio value decrease is greater than the reduction in the air-cooled samples (Figure 10). Decreases become important from the 400 °C temperature, reaching 40% (dry-cooled) and 68% (water-cooled) of the target values at 600 °C.

The mechanical tests yield similar results (Figure 11). Losses can reach 70% of the target value.

4.5. Uniaxial compressive strength

Uniaxial compressive strength test was performed following ISRM suggested methods (ISRM, 1979). The uniaxial compressive strength was more moderately affected by temperature in the air-cooled specimens. However decrease is much higher in those cooled by water immersion at ambient temperature. Fig. 12 shows the uniaxial compressive strength values obtained for both, air-cooled and water-cooled, procedures.

Fig. 13 shows the reduction of strength with both cooling methods. As it can be seen, uniaxial compressive strength decrease reaches 34% at 600 °C, in dry-cooled, and rises over 50% in water cooled samples with 600 °C heating temperature.

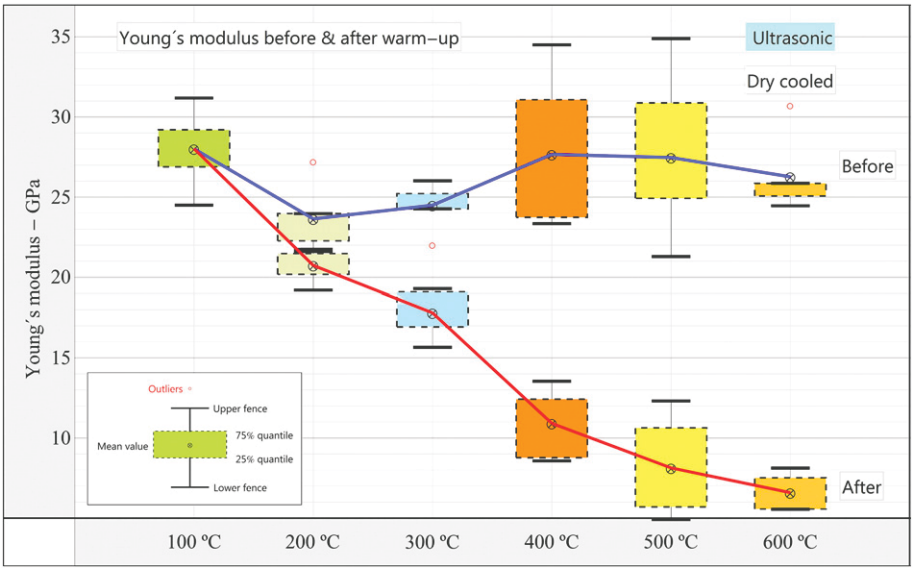


Fig. 6. Young's modulus before/after heat treatment (ultrasonic waves).

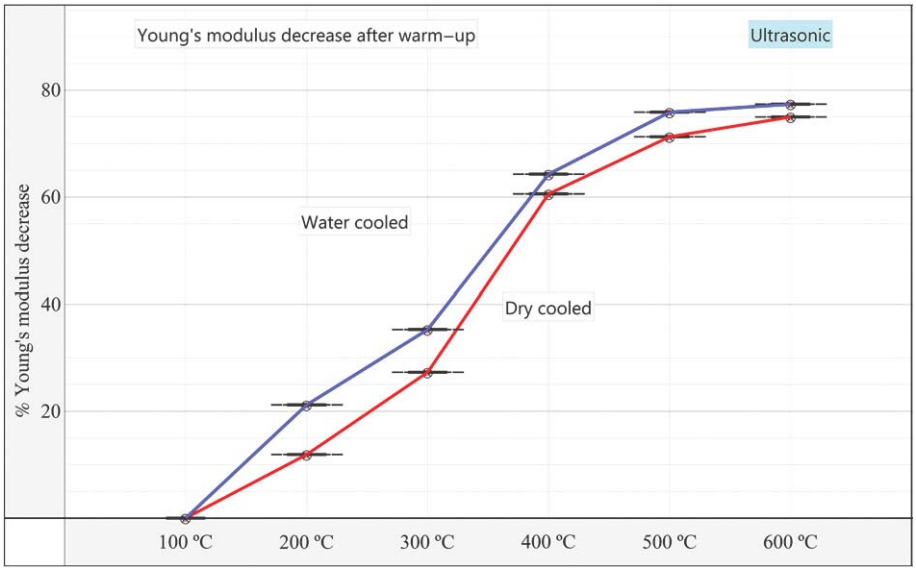


Fig. 7. Young's modulus decrease after heat treatment (ultrasonic waves).

4.6. Durability (Sehudes index)

This test is performed to determine the resistance of a rock sample to the weakening and disintegration when subjected to standard wear wet-dry cycles according to ISRM suggested methods (ISRM, 1977). Standardized rock fragments in dimensions and weight, are introduced in a rotating drum partially submerged in water. The drum is rotated at 20 rpm by 10 min and then the whole is dried and weighed. The weight percentage retained after each cycle, in relation to the initial weight, is the Sehudes index. Soft rocks are conventionally classified subjecting them to one (I_{d1}) or two cycles (I_{d2}). Durability is slightly affected by thermal effect (Figure 14). Durability loss after 1 cycle is 0.87% (99.13) in intact rock, and 1.02% (98.98) in samples heated to 600 °C. After 2 cycles, losses in intact samples and 600 °C heated are respectively 1.46% (98.54) and 1.96% (98.04) (Figure 14), too small difference to be considered statistically significant. Fig. 14 shows the results of the five cycles tested for each temperature at which the samples were subjected.

5. Discussion

Different physical and mechanical parameters of San Julian's stone have been obtained from laboratory tests (i.e. open porosity, ultrasonic wave's attenuation, Young's modulus — from ultrasonic waves and mechanical tests, Poisson's ratio — from ultrasonic waves and mechanical tests, uniaxial compressive strength — from mechanical tests, and durability Sehudes index — Slake Durability Test) and shown in previous sections. The main obtained results are discussed below.

Porosity and ultrasonic wave attenuation exhibit a similar trend for the different temperatures. Open porosity increases with temperature until 14% at 600 °C, in dry-cooled samples, with linear progression from 300 °C. For water-cooling, the trend exhibits the same increase with temperature, but with a smaller range (7%). This may be due to the degradation of a larger amount of the constituent minerals during longer cooling process (dry). The mentioned porosity increase is reflected in ultrasonic wave attenuation, with a parallel growth. The average values of attenuation before treatment are 3.88 ± 0.34 dB/cm

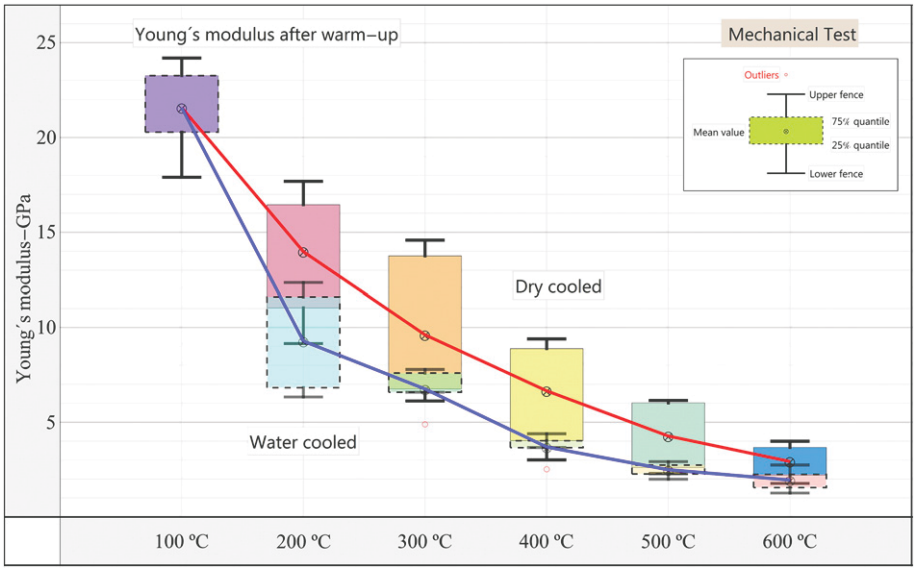


Fig. 8. Young's modulus after heat treatment (mechanical test).

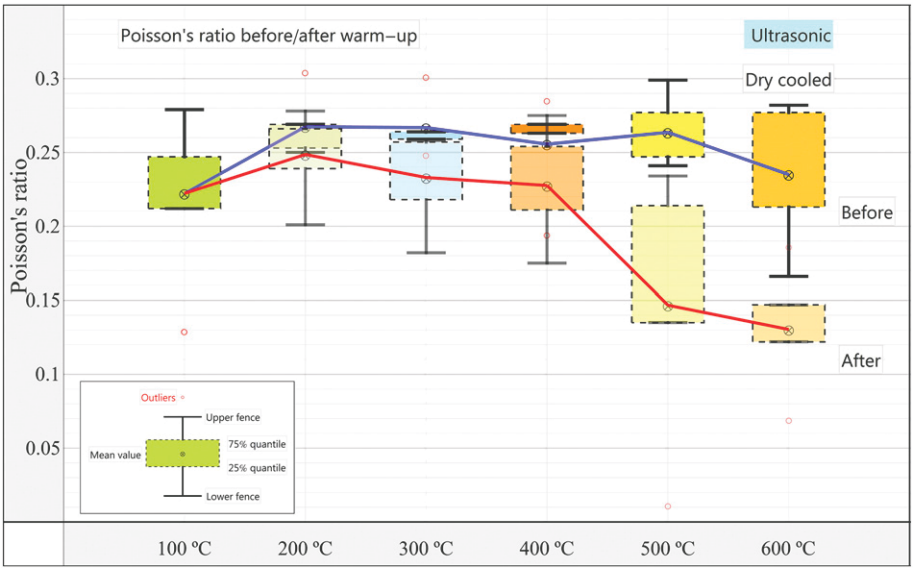


Fig. 9. Poisson's ratio before/after heating treatment (ultrasonic waves).

and 3.47 ± 0.63 dB/cm for dry-cooled and water-cooled samples respectively. Once the samples were heated, the attenuation increased up to 5.46 ± 0.47 dB/cm and 4.78 ± 0.91 dB/cm for dry-cooled and water-cooled samples respectively, which is a measure of the no influence of the cooling-water method (39.4% for air-cooled versus 34.8% for water-cooled). This seems to go against to the open porosity which highly increases in the air-cooled samples. Probably due to the development of internal micro-cracks caused by high temperature gradients during the sudden cooling, physical nature of the stone sample water-cooled is widely altered by temperature increasing wave attenuation, whilst in air-cooled samples, increased porosity is mainly due to an increase of the existing pores size, slightly affecting internal parts of the material and therefore the wave attenuation. This causes a similar increase of attenuation for both cooling methods, although the porosity increases much more for the air cooled method than for water cooling one. Traditional methods for measuring the porosity are more sensitive to this type of porosity, whilst not accurately detect internal micro-cracks (Chaki et al., 2008). The attenuation of the ultrasonic waves can better detect these micro-cracks.

Young's modulus, Poisson's ratio and uniaxial compressive strength clearly diminish with temperature increase. The Young's modulus can reach maximum falls next to 80% at the maximum temperature. The static method marks the same trend with slightly lower absolute values (usual relationship between dynamic and static techniques for this type of rocks), for the whole temperature range. The two techniques also show the same results regarding the influence of the cooling method, showing that the changes are slightly most pronounced in water-cooled samples. The Poisson's ratio has been obtained by ultrasonic waves and mechanical tests exhibiting a similar behaviour than Young's modulus (linear decrease with temperature, and slightly greater influence in the water-cooled specimens). The two used techniques provide the same trends. The uniaxial compressive strength obtained by mechanical tests shows a linear decrease with temperature, up to 35% in dry-cooled, and more to 50% in water-cooled samples. From all the parameters studied in this work, the uniaxial compressive strength is the most sensitive to the cooling method. As observed for porosity and wave attenuation, the sudden water-cooling generates micro-cracks affecting the whole specimen and connecting pores, unlike the slow

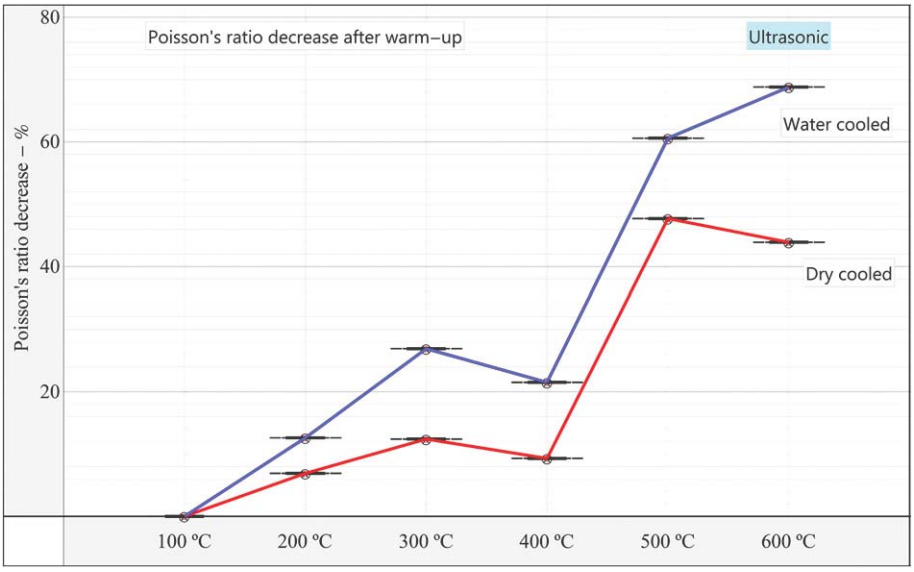


Fig. 10. Poisson's ratio decrease after heat treatment (ultrasonic waves).

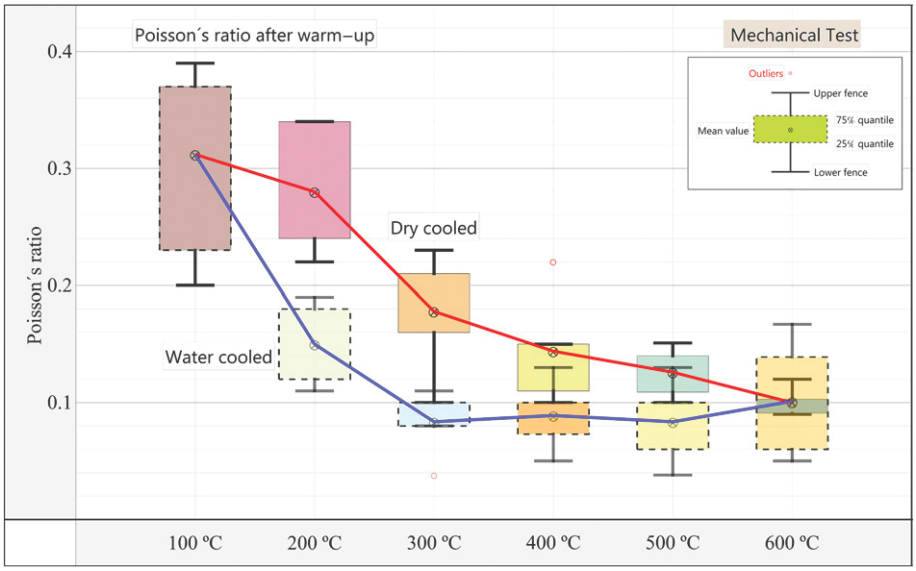


Fig. 11. Poisson's ratio after heat treatment (mechanical test).

cooling effect which focuses on further expansion of the pores produced in the heating. Thus the fast cooling has the greatest impact on strength.

Durability is little affected by the heat treatment at used temperatures. Sehudes index, after 2 cycles (I_{d2}) is 98.54%. This index is generally considered "High" from 95 to 98% and "Very high" from 98%. Studied rock is then regarded as "Very high durability". The heating process cannot get the I_{d2} down from 97.8% in the worst case. Even after 5 cycles of slake durability test the lower index is 95.55% (I_{d5}), in the samples heated at 600 °C. The durability classification remains very high after subjecting the samples to 600 °C temperature. The internal changes that have reduced drastically the uniaxial compressive strength and the elastic constants, have minimal impact on the durability of the stone measured in slake durability test.

In summary, the obtained results reveal the wide influence of the temperature on the studied physical and mechanical properties of the San Julian's stone, mainly when a water cooling method is used.

6. Conclusions

The influence of thermal damage and cooling method on some physical properties (i.e. open porosity, ultrasonic wave propagation, elastic constants, uniaxial compressive strength and durability) of the San Julian's calcarenite stone has been studied.

The open porosity was computed from weight and volume measurements of rock samples. Moreover, elastic constants were obtained from ultrasonic wave propagation and mechanical tests. The uniaxial compressive strength was achieved from mechanical test. Finally, durability was evaluated by means of slake durability test.

All observed parameters reflect the induced thermal-damage in the studied rock. Except in the porosity parameter, the property variation with temperature is very pronounced in percentage and absolute terms, with equivalent results in all measurement techniques, whereby,

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

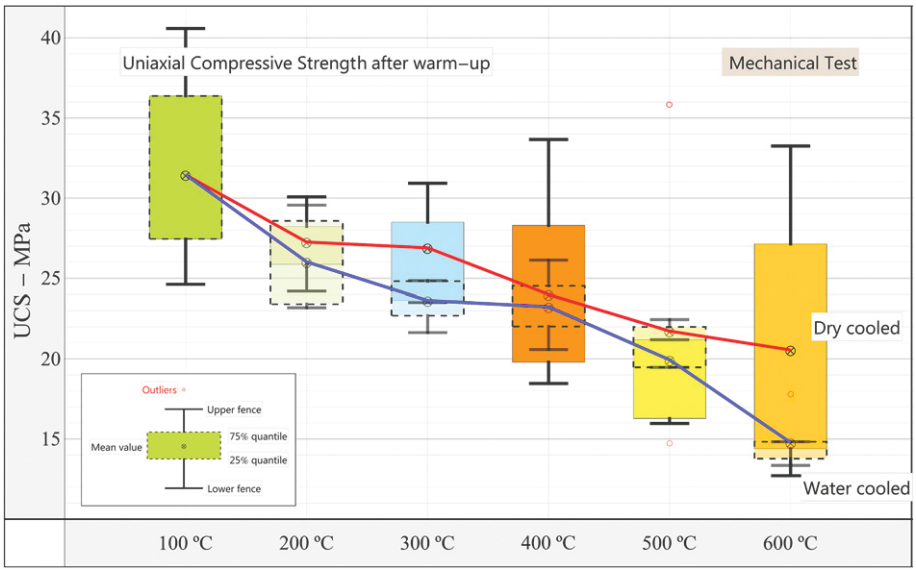


Fig. 12. Uniaxial compressive strength after heat treatment (mechanical test).

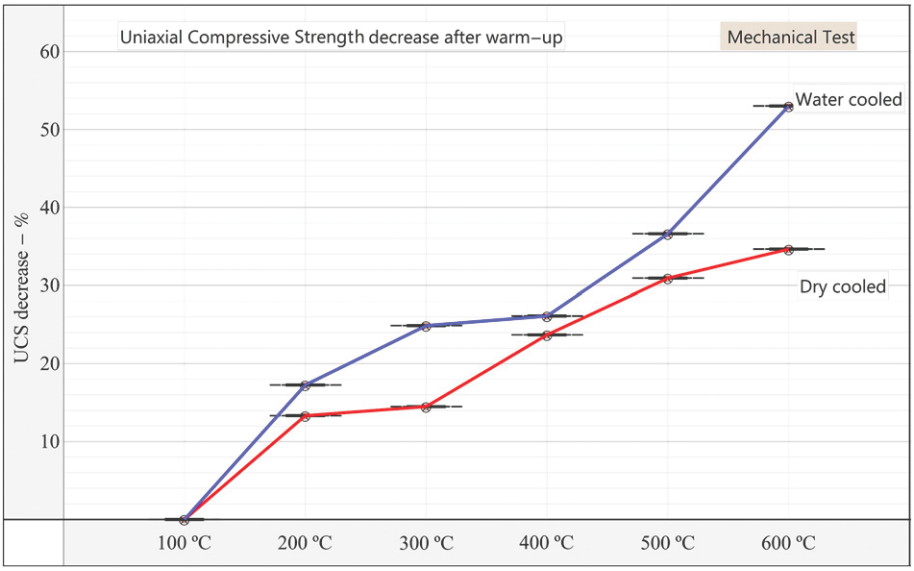


Fig. 13. Uniaxial compressive strength decrease after heat treatment (mechanical test).

the thermal deterioration level can be inferred similarly with destructive or non-destructive employed techniques. Regarding the influence of the cooling method, it can be observed for all parameters, but by far the greatest differences are observed for the uniaxial compressive strength of the stone, with losses of 34% and 53% for dry-cooled and water-cooled samples respectively. In fact, except for porosity, the changes produced by the heat treatment are amplified when cooling is realized by immersion in water. This may be because the air-cooling is limited to increase the number and size of pores although water-cooling causes micro-cracks by linking pores (stresses by temperature gradient) degrading physical properties of the stone.

A more detailed study of the cooling method influence, the pore distribution after heating and the mineralogical composition evolution at different temperatures will be the aim of future researches.

Acknowledgements

The authors would like to thank Dr. David Benavente and Dr. Javier Martínez from the Earth Sciences Department from the University of Alicante for the mineralogical description of the rock and for allowing us to perform ultrasonic tests on their dependences and the company U.T.E. FCC Construcción, S.A. and Enrique Ortiz e Hijos Contratistas de Obras, S.A for the provided rock samples from the TRAM tunnel excavation. This work has been funded by the Universidad de Alicante under the projects uausti11-11, VIGROB-212 and gre09-40 and by the Generalitat Valenciana under the project gv/2011/044.

References

AENOR, 2005. UNE-EN 14579. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la velocidad de propagación del sonido.Asociación Española de Normalización y Certificación.

AENOR, 2007. UNE-EN 1936: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.Asociación Española de Normalización y Certificación.

Anon., 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping part I: rock and soil materials. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. 19, 364–371.

Brotons, V., Ivorra, S., Martínez-Martínez, J., Tomás, R., Benavente, D., 2013. Study of creep behavior of a calcarenite: San Julián´s stone (Alicante). Materiales De Construccion 62. http://dx.doi.org/10.3989/mc.2013.06412.

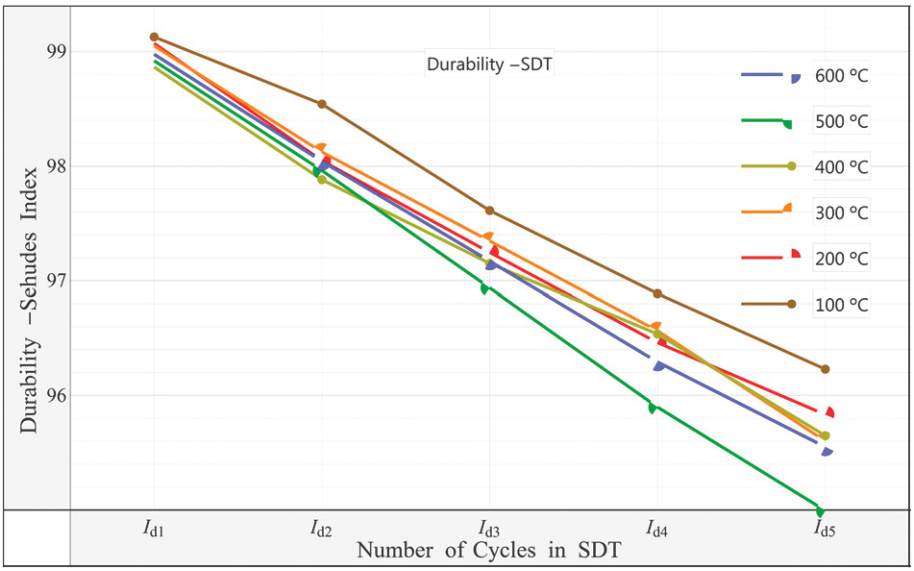


Fig. 14. Sehudes index in Slake durability test.

Chaki, S., Takarli, M., Agbodjan, W.P., 2008. Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions. Constr. Build. Mater. 22, 1456–1461.
Chakrabarti, B., Yates, T., Lewry, A., 1996. Effect of fire damage on natural stonework in buildings. Constr. Build. Mater. 10, 539–544.
Dunham, R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. Mem. Am. Assoc. Pet. Geol. 1, 108–121.
Ferrero, A.M., Marini, P., 2001. Experimental studies on the mechanical behaviour of two thermal cracked marbles. Rock Mech. Rock. Eng. 34, 57–66.
Glover, P.W.J., Baud, P., Darot, M., Meredith, P.G., Boon, S.A., Leravalec, M., Zoussi, S., Reuschle, T., 1995. Alpha/beta phase-transition in quartz monitored using acoustic emissions. Geophys. J. Int. 120, 775–782.
Gomez-Heras, M., Fort, R., Morcillo, M., Miolpeceres, C., Ocaña, J.L., 2008. Laser heating: a minimally invasive technique for studying fire-generated heating in building stone. Mater. Constr. 58, 203–217.
Gomez-Heras, M., Gomez-Villalba, L.S., Fort, R., 2010. Cambios de Fase en Litoarenitas Calcáreas con la Temperatura: Implicaciones para el Deterioro Causado por Incendios. Macla Rev. Soc. Esp. Mineral. 101–102.
Hajpal, M., 2002. Changes in sandstones of historical monuments exposed to fire or high temperature. Fire Technol. 38, 373–382.
Hajpal, M., Torok, A., 2004. Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat. Environ. Geol. 46, 311–322.
Hong, T., Kempka, T., Neng-Xiong, X., Ziegler, M., 2012. Physical properties of sandstones after high temperature treatment. Rock Mechanics and Rock Engineering 45, 1113–1117.
ISRM, 1977. SM for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. ISRM Suggest. Methods 2, 92–94.
ISRM, 1979. SM for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. ISRM Suggest. Methods 2, 137–140.
Jansen, D.P., Carlson, S.R., Young, R.P., Hutchins, D.A., 1993. Ultrasonic-imaging and acoustic-emission monitoring of thermally-induced microcracks in lac-du-bonnet-granite. J. Geophys. Res. Solid Earth 98, 22231–22243.
Koca, M.Y., Ozden, G., Yavuz, A.B., Kincal, C., Onargan, T., Kucuk, K., 2006. Changes in the engineering properties of marble in fire-exposed columns. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 43, 520–530.
Martin, J.D., 2004. Using XPowder: A Software Package for Powder X-ray Diffraction Analysis. D.L. GR 1001/04 84-609-1497-6 105.
Martinez-Martinez, J., Benavente, D., Garcia-del-Cura, M.A., 2011. Spatial attenuation: the most sensitive ultrasonic parameter for detecting petrographic features and decay processes in carbonate rocks. Eng. Geol. 119, 84–95.
Ranjith, P.G., Viete, D.R., Chen, B.J., Perera, M.S.A., 2012. Transformation plasticity and the effect of temperature on the mechanical behaviour of Hawkesbury sandstone at atmospheric pressure. Engineering Geology 151, 120–127.
Rao, Q.-h, Wang, Z., Xie, H.-f, Xie, Q., 2007. Experimental study of mechanical properties of sandstone at high temperature. J. Cent. S. Univ. Technol. 14, 478–483.
Sánchez, R., 2005. Estudio petrográfico y petrofísico de la piedra de San Julián. Universidad de Alicante (internal report).
Wu, Z., Qin, B., Chen, L., Luo, Y., 2005. Experimental study on mechanical character of sandstone of the upper plank of coal bed under high temperature. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 24, 1863–1867.
Yavuz, H., Demirdag, S., Caran, S., 2010. Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 47, 94–103.
Zhang, J.X., Davis, D.M., Wong, T.F., 1993. The brittle-ductile transition in porous sedimentary-rocks — geological implications for accretionary wedge aseismicity. J. Struct. Geol. 15, 819–830.
Zhang, L., Mao, X., Lu, A., 2009. Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature. Sci. China Ser. E-Technol. Sci. 52, 641–646.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3. Artículo tercero

Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A.: "Relationship between static and dynamic elastic modulus of a calcarenite heated at different temperatures: the San Julián's stone", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. BOEG-D-13-00162R3, n. (2014), pp. doi: 10.1007/s10064-014-0583-y.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Springer

Dear Author,

Here are the proofs of your article.

- You can submit your corrections **online**, via **e-mail** or by **fax**.
- For **online** submission please insert your corrections in the online correction form. Always indicate the line number to which the correction refers.
- You can also insert your corrections in the proof PDF and **email** the annotated PDF.
- For fax submission, please ensure that your corrections are clearly legible. Use a fine black pen and write the correction in the margin, not too close to the edge of the page.
- Remember to note the **journal title**, **article number**, and **your name** when sending your response via e-mail or fax.
- **Check** the metadata sheet to make sure that the header information, especially author names and the corresponding affiliations are correctly shown.
- **Check** the questions that may have arisen during copy editing and insert your answers/ corrections.
- **Check** that the text is complete and that all figures, tables and their legends are included. Also check the accuracy of special characters, equations, and electronic supplementary material if applicable. If necessary refer to the *Edited manuscript*.
- The publication of inaccurate data such as dosages and units can have serious consequences. Please take particular care that all such details are correct.
- Please **do not** make changes that involve only matters of style. We have generally introduced forms that follow the journal's style.
  Substantial changes in content, e.g., new results, corrected values, title and authorship are not allowed without the approval of the responsible editor. In such a case, please contact the Editorial Office and return his/her consent together with the proof.
- If we do not receive your corrections **within 48 hours**, we will send you a reminder.
- Your article will be published **Online First** approximately one week after receipt of your corrected proofs. This is the **official first publication** citable with the DOI. **Further changes are, therefore, not possible.**
- The **printed version** will follow in a forthcoming issue.

Please note

After online publication, subscribers (personal/institutional) to this journal will have access to the complete article via the DOI using the URL: http://dx.doi.org/[DOI].
If you would like to know when your article has been published online, take advantage of our free alert service. For registration and further information go to: http://www.link.springer.com.

Due to the electronic nature of the procedure, the manuscript and the original figures will only be returned to you on special request. When you return your corrections, please inform us if you would like to have these documents returned.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Metadata of the article that will be visualized in OnlineFirst

ArticleTitle	Relationship between static and dynamic elastic modulus of calcarenite heated at different temperatures: the San Julián's stone	
Article Sub-Title		
Article CopyRight	Springer-Verlag Berlin Heidelberg (This will be the copyright line in the final PDF)	
Journal Name	Bulletin of Engineering Geology and the Environment	
Corresponding Author	Family Name	**Brotons**
	Particle	
	Given Name	**V.**
	Suffix	
	Division	Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior
	Organization	Universidad de Alicante
	Address	P.O. Box 99, Alicante, 03080, Spain
	Email	vicente.brotons@ua.es
Author	Family Name	**Tomás**
	Particle	
	Given Name	**R.**
	Suffix	
	Division	Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior
	Organization	Universidad de Alicante
	Address	P.O. Box 99, Alicante, 03080, Spain
	Email	
Author	Family Name	**Ivorra**
	Particle	
	Given Name	**S.**
	Suffix	
	Division	Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior
	Organization	Universidad de Alicante
	Address	P.O. Box 99, Alicante, 03080, Spain
	Email	
Author	Family Name	**Grediaga**
	Particle	
	Given Name	**A.**
	Suffix	
	Division	Departamento de Tecnología Informática y Computación, Escuela Politécnica Superior
	Organization	Universidad de Alicante
	Address	P.O. Box 99, Alicante, 03080, Spain
	Email	
Schedule	Received	13 July 2013
	Revised	
	Accepted	18 February 2014

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Abstract	The San Julián's stone is the main material used to build the most important historical buildings in Alicante city (Spain). This paper describes the analysis developed to obtain the relationship between the static and the dynamic modulus of this sedimentary rock heated at different temperatures. The rock specimens have been subjected to heating processes at different temperatures to produce different levels of weathering on 24 specimens. The static and dynamic modulus has been measured for every specimen by means of the ISRM standard and ultrasonic tests, respectively. Finally, two analytic formulas are proposed for the relationship between the static and the dynamic modulus for this stone. The results have been compared with some relationships proposed by different researchers for other types of rock. The expressions presented in this paper can be useful for the analysis, using non-destructive techniques, of the integrity level of historical constructions built with San Julián's stone affected by fires.
Keywords (separated by '-')	Non-destructive techniques - Calcarenite stone - Elastic dynamic modulus - Elastic static modulus - San Julián's stone - Temperature
Footnote Information	

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Journal: 10064
Article: 583

Author Query Form

Please ensure you fill out your response to the queries raised below and return this form along with your corrections

Dear Author

During the process of typesetting your article, the following queries have arisen. Please check your typeset proof carefully against the queries listed below and mark the necessary changes either directly on the proof/online grid or in the 'Author's response' area provided below

Query	Details required	Author's response
1.	Please note that the reference citation name Van Heerden's has been changed to Vanheerden's. Please check and confirm.	
2.	Please provide publisher location for the reference AENOR (2007).	
3.	Please confirm the doi and ISBN number in reference Martin (2004) and others. Is all the reference citations formatted correctly?	

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Bull Eng Geol Environ
DOI 10.1007/s10064-014-0583-y

ORIGINAL PAPER

Relationship between static and dynamic elastic modulus of calcarenite heated at different temperatures: the San Julián's stone

V. Brotons · R. Tomás · S. Ivorra · A. Grediaga

Received: 13 July 2013 / Accepted: 18 February 2014
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Abstract The San Julián's stone is the main material used to build the most important historical buildings in Alicante city (Spain). This paper describes the analysis developed to obtain the relationship between the static and the dynamic modulus of this sedimentary rock heated at different temperatures. The rock specimens have been subjected to heating processes at different temperatures to produce different levels of weathering on 24 specimens. The static and dynamic modulus has been measured for every specimen by means of the ISRM standard and ultrasonic tests, respectively. Finally, two analytic formulas are proposed for the relationship between the static and the dynamic modulus for this stone. The results have been compared with some relationships proposed by different researchers for other types of rock. The expressions presented in this paper can be useful for the analysis, using non-destructive techniques, of the integrity level of historical constructions built with San Julián's stone affected by fires.

Keywords Non-destructive techniques · Calcarenite stone · Elastic dynamic modulus · Elastic static modulus · San Julián's stone · Temperature

V. Brotons (✉) · R. Tomás · S. Ivorra
Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, P.O. Box 99, 03080 Alicante, Spain
e-mail: vicente.brotons@ua.es

A. Grediaga
Departamento de Tecnología Informática y Computación, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, P.O. Box 99, 03080 Alicante, Spain

Introduction

The Young's modulus, also called elastic modulus, is one of the most important mechanical characteristic parameters of the rocks in relation to use as a construction material. This parameter varies with the degree of weathering of the rock. As a consequence it is essential in engineering to state the value of the modulus corresponding to the different weathering states, taking as a reference the unaltered Young's modulus. Usually, it is not possible to perform static laboratory tests from drilled samples (e.g. in historical buildings) and modulus must be obtained from ultrasonic testing. Because the static modulus (E_{st}) is required for computing the deformations of a building after it comes into service under the applied loads, the static modulus, obtained from conventional laboratory procedures, is required. In these cases in which it is not possible to perform destructive tests to determine the characteristics of the rock, the use of non-destructive techniques using mobile devices constitutes an alternative option.

The dynamically determined elastic modulus (E_{dyn}) is generally higher than that statically determined, and both methods provide high divergent results for low elasticity modulus rocks (Ide 1936). Several studies (e.g. Ide 1936; Vanheerden 1987; Al-Shayea 2004; Kolesnikov 2009) explain these differences by means of the nonlinear elastic response at different ranges of amplitude of the strains ($\in$) involved in the distinct techniques. Other authors (Kolesnikov 2009; Ciccotti and Mulargia 2004) consider that the static test is a dynamic test at a very low frequency, and they highlight the nonlinear elastic response to different associated frequencies (f). Kolesnikov (2009) uses the Kjartansson constant Q-model (Kjartansson 1979) to analyse the effects of intrinsic dispersion of pressure wave velocities in absorbing media (and it is well known that all

Journal : Large 10064 | Dispatch : 3-3-2014 | Pages : 9
Article No. : 583 | ☐ LE | ☐ TYPESET
MS Code : BOEG-D-13-00162 | ☑ CP | ☑ DISK

Author Proof
UNCORRECTED PROOF
Universidad de Alicante

Author Proof

rocks absorb energy of elastic waves to a greater or lesser extent). By means of static and dynamic tests, this author obtains the experimental estimation of the possible effect of intrinsic velocity dispersion on the results of the elastic modulus measurements, and concludes that the frequency (f) about 3×10^{-4} Hz corresponds to the observed ratio $E_{st}/E_{dyn} = 0.57$, and must be associated to its static test. Ciccotti and Mulargia (2004) noted that because their tests have a typical duration of about 20 min, the static measurements must be associated with a frequency of approximately 10^{-3} Hz. Both frequency and amplitude of strains are parameters with an important influence on the viscoelastic behaviour of the material (Kjartansson 1979). Ciccotti and Mulargia performed different tests on high-strength limestone samples (i.e. more than 75 MPa), covering a wide range of frequencies and strains. They found no significant dependence of the measured modulus with respect to the two studied variables. The difference between the static and the dynamic modulus is also explained considering the differential effects of porosity, size, and spatial orientation of cracks or bedding planes on both different measurement techniques (Ide 1936; Eissa and Kazi 1988; King 1983; Al-Shayea 2004; Vanheerden 1987). The static method, which is necessary for quantifying the rock deformability, is more sensitive to the presence of discontinuities in the rock. The study of a high-strength limestone (i.e. 70 MPa) (Al-Shayea 2004) showed that the ratio between both moduli:

$$k = E_{dyn}/E_{st} \tag{1}$$

is close to one for static modulus measured at very low loading levels ($\sim$10 % of uniaxial compressive strength). The dynamic modulus (E_{dyn}) and Poisson's ratio (v_{dyn}) are usually computed from Eqs. (2) and (3):

$$E_{dyn} = \rho_{bulk} V_s^2 \frac{\left(4V_s^2 - 3V_p^2\right)}{\left(V_s^2 - V_p^2\right)} \tag{2}$$

$$v_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2V_p^2 - 2V_s^2} \tag{3}$$

where E_{dyn} is the dynamic Young's modulus, and v_{dyn} is the Poisson's ratio. V_p is the compressional (P) waves velocity; V_s is the shear (S) waves velocity, and ρ_{bulk} is the bulk density of the material.

The relationships between the static and dynamic moduli for different types of rocks and variation ranges proposed by various authors (King 1983; Vanheerden 1987; Eissa and Kazi 1988; Martinez-Martinez et al. 2012) are summarized in Table 1. Note that Eissa and Kazi (1988) performed a statistical analysis using 76 observations from three different sources of information, for which bulk density is known, defining twelve different variables including E_{st}, E_{dyn}, ρ_{bulk}, and nine combinations of them. Each defined variable was correlated with the remaining variables, covering all the possible combinations, and leading to the conclusion that the value of the static modulus of elasticity can be best predicted ($r^2 = 0.92$) from the relationship shown in Eq. (7) (Table 1).

Figure 1 shows the plot of the equations included in Table 1 for their respective validity ranges. The relationship defined by Martinez-Martinez et al. (2012) is not included in the plot because this would require us to assume a function that relates the spatial attenuation with the dynamic modulus. Note that in the Van Heerden's (1987) relationship, the four curves that are shown in Fig. 1 correspond to four different sets of a and b values obtained for the stress-level applied to the tested rock (considered stresses are 10, 20, 30 and 40 MPa). Also notice that in order to represent the nonlinear Eissa and Kazi's (1988) equation we have assumed a correlation between bulk density and dynamic modulus based on published data, which is shown in Fig. 1. All curves are represented in the region of $k > 1$ with dynamic modulus values lower than 130 GPa.

The general trend exhibits a k decrease when dynamic modulus increases, for both linear and non-linear regressions. Therefore, it can be stated that for rocks with a high modulus of elasticity the value of k is closer to one.

The main aim of this work is to propose a new correlation for obtaining the static modulus of the San Julián's stone, a stone widely used for historical building construction in Alicante city, from tests with ultrasound waves. For this purpose, unaltered samples of San Julián's stone have been heated at different temperatures in order to accelerate aging of the stone, and consequently, to induce changes in the deformational properties of the rock (i.e. in the elastic modulus). The comparison between the parameters measured from undisturbed and heated samples has provided a significant relationship between elastic and dynamic modulus, which has been compared with the previously mentioned correlations proposed by other authors. The obtained correlations are very useful in non-destructive techniques for evaluating the integrity level of historical constructions affected by fires using.

Materials and samples preparation

Block samples were taken from the Serra Grossa hill, located NE of the urban area of Alicante (SE of Spain). This relief consists of gently dipping (150/20), light yellowish–white, fine to medium-grain size biocalcarenites

UNCORRECTED PROOF
Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Journal : Large 10064 | Dispatch : 3-3-2014 | Pages : 9
Article No. : 583 | LE | TYPESET
MS Code : BOEG-D-13-00162 | CP | DISK

Table 1 Relationship between static (E_{st}) and dynamic (E_{dyn}) moduli proposed by different authors

References	Relationship	R^2	Samples	E_{dyn} range (GPa)	Rock type
King (1983)	$E_{st} = 1.26\,E_{dyn} - 29.5$ (4)	0.82	174	40–120	Igneous-metamorphic
Vanheerden (1987)	$E_{st} = aE_{dyn}^{b}$ (5)	–	–	20–135	Sandstone-granite
Eissa and Kazi (1988)	$E_{st} = 0.74\,E_{dyn} - 0.82$ (6)	0.70	342	5–130	All types
Eissa and Kazi (1988)	$\log_{10}E_{st} = 0.77\log_{10}(\rho_{bulk}E_{dyn}) + 0.02$ (7)	0.92	76	5–130	All types
Martinez-Martinez et al. (2012)	$E_{st} = \frac{E_{dyn}}{3.8\alpha_s^{-0.68}}$ (8)	–	–	5–50	Limestone-marble

Note that ρ_{bulk} in Eissa and Kazi's (1988) equation is originally expressed in grams per cubic centimetre, although in this work it is expressed in SI units. These equations are plotted in Fig. 1

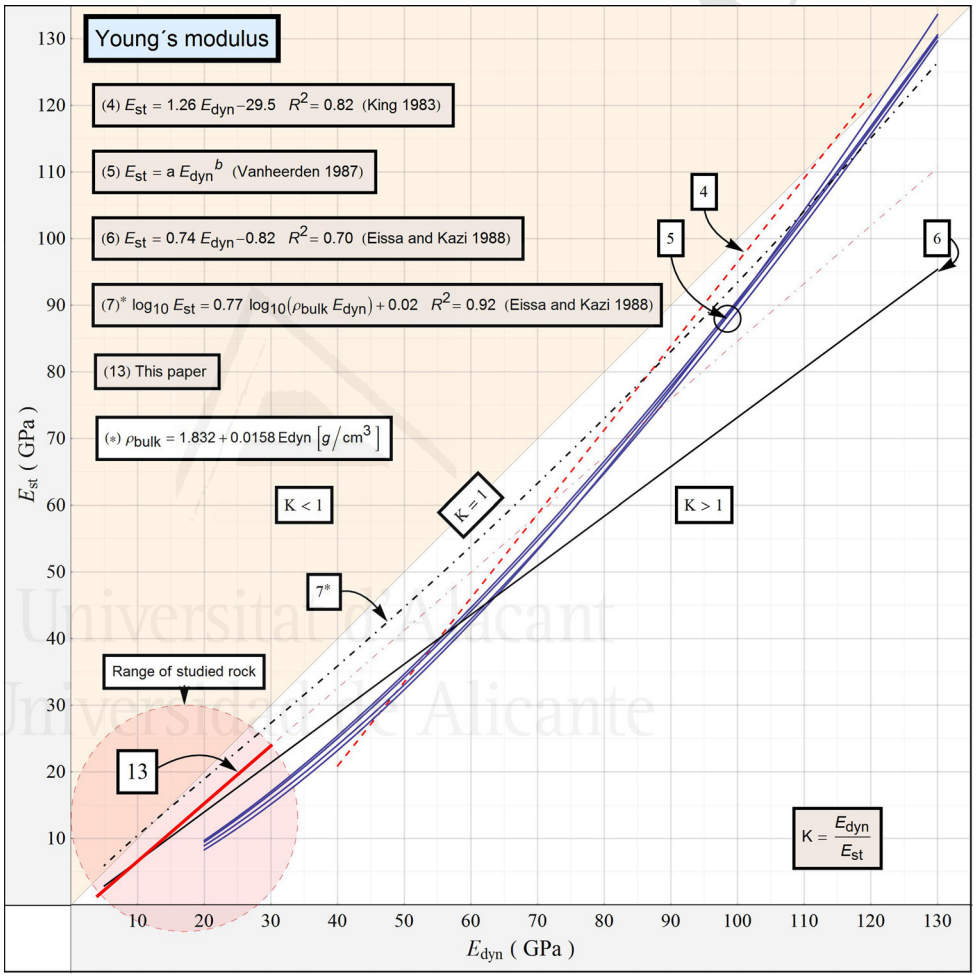


Fig. 1 Plot of the relationship between static and dynamic Young's modulus shown in Table 1. Note that the relationships have been only represented for their range of validity

[according to ISRM (1977)]. This succession, up to 150 m thick, is upper Miocene in age (Montenat 1977; Montenat et al. 1990).

The rock is locally known as San Julián's stone and has been widely used since the Roman period for the construction of buildings in Alicante city and its surroundings (e.g. Lucentum, the Roman predecessor of the city of Alicante, Santa Bárbara's Castle, City Council building, and Gravina Palace). The specimens studied in this paper were obtained from rock blocks collected from the dump of a railway tunnel under construction. The rock blocks were picked up just after the mechanical excavation and transported to the laboratory, where the samples were extracted by means of a drill. An X-ray diffraction analysis was performed and interpreted using the XPowder software package (Martin 2004). The qualitative search-matching

Journal : Large 10064 Dispatch : 3-3-2014 Pages : 9
Article No. : 583 LE TYPESET
MS Code : BOEG-D-13-00162 CP DISK

Table 2 Summary of physical and mechanical properties of the tested intact rock samples of San Julián's stone

Parameter	Mean	SD	SEM
Bulk density, ρ_{bulk} (KN/m^3)	21.03	0.72	0.15
Open porosity, n_0 (%)	20.8	3.33	0.68
Total porosity, n (%)	22.3	2.72	0.56
Attenuation, α_s (dB/cm)	4.0	0.39	0.08
Young's modulus, *E* (GPa)			
From ultrasonic waves	27.4	3.15	0.64
From mechanical tests[a]	21.6	2.25	1.01
Poisson's ratio, *v*			
From ultrasonic waves	0.24	0.04	0.01
From mechanical tests[a]	0.30	0.08	0.04
Uniaxial compressive strength[a], σ_{ci} (MPa)	31.5	6.01	2.69

[a] The mean values were obtained from 24 samples, except for the mechanical tests that were performed on five rock samples. *SD* standard deviation, *SEM* standard error of the mean

Table 3 Number of tested samples after heating at different temperatures

Temperature (°C)	Air cooled No. of samples	Water cooled No. of samples	Total
105[a]	5	–	5
200	2	1	3
300	2	1	3
400	3	2	5
500	2	1	3
600	3	2	5
Total	17	7	24

[a] Reference temperature. The 24 samples were previously heated at 105 °C and air cooled for performing non-destructive tests and obtaining reference values. Previous uniaxial compressive strength and mechanical elastic modulus (destructive test) were only obtained for five of these samples in order to determine reference values

procedure was based on the ICDD-PDF2 database. The main components derived from the analysis are: calcite (70 %), iron-rich dolomite (25 %), quartz (5 %), and traces of clay minerals (illite) (Brotons et al. 2013). The studied rock corresponds to a very porous biocalcarenite (a grainstone according to Dunham 1962). From a textural point of view, this rock presents abundant allochemicals, generally smaller than 2 mm size, although bands of various grain sizes have been found. The rock presents a wide variety of fossil bryozoans, foraminifera, red algae, and echinoderm fragments. The orthochemical fraction mainly corresponds to sparite (Louis Cereceda et al. 2001). The studied rock presents medium to high values of open porosity (20.8 ± 3.3 %) and a bulk density of 21.0 ± 0.7 kN/m^3 (according to Spanish standard AENOR 2007). Complementarily, a mercury intrusion porosimetry test has been performed over a representative sample of the studied rock in order to study the pore size distribution. The test indicates that the rock has a macroporosity (>5 μm) of 55.1 % and a microporosity (<5 μm) of 44.9 %, with a mean pore size of 37.52 μm.

For this study, 24 cylindrical samples of 52 mm in diameter and 125 mm long were obtained; the choice of a 2.5 slenderness ratio was made to ensure their suitability for the tests to be conducted according to relevant standards (ISRM 1979). The bases of the cylinders were treated to ensure flatness and perpendicularity relative to the guideline. Table 2 shows the main physical and mechanical properties of the studied rock and the associated errors, where Standard deviation (SD) represents the variance in the values of a variable, whereas the standard error of the mean (SEM) is the standard deviation of the sampling distribution of the mean. Therefore, the SEM provides an idea of the accuracy of the mean, and SD gives an idea of the variability of individual observations. These two parameters are related to each other through the expression:

$$\mathrm{SEM} = \mathrm{SD}/\sqrt{n} \quad (9)$$

where SEM is the standard error of the mean; SD is the standard deviation, and n is the number of samples.

The formula shows that the larger the sample size, the smaller the standard error of the mean. More specifically, the size of the standard error of the mean is inversely proportional to the square root of the sample size.

Note that 24 intact samples were tested for determining the mean values of the different parameters, except for destructive tests (mechanical tests), which were only performed over 5 samples.

The anisotropy of the rock was evaluated by testing six cubic samples of different sizes by means of ultrasonic P-wave velocity (V_p), ultrasonic S-wave velocity (V_s), and spatial attenuation (α_s). The obtained results in three orthogonal directions were highly similar for the tested specimens, providing anisotropy factors (i.e. the ratio between the values measured in two different directions) lower than 1.05 for all the tested samples, indicating a clear isotropic behaviour of the rock.

Methodology

Heating process

In order to analyse the effect of heating on the rock properties, the specimens were subjected to a heating process at different temperatures. This heating process was performed in an oven in order to reach the target temperature in 60 min. Once target temperatures of 105, 200, 300, 400, 500 and 600 °C were reached for the different samples, the

Author Proof
UNCORRECTED PROOF

Journal : Large 10064 Dispatch : 3-3-2014 Pages : 9
Article No. : 583 LE TYPESET
MS Code : BOEG-D-13-00162 CP DISK

temperatures were kept for 1 h and then cooled in two different ways (Table 3): air cooled at laboratory temperature and by water immersion at laboratory temperature in a 10 l vessel for 5 min. Finally, the samples were kept dry until the completion of subsequent tests. Table 3 shows the number of tested samples for each condition.

Ultrasonic test

Ultrasonic waves were measured using a signal emitting-receiving device (Panametrics-NDT 5058PR) coupled to an oscilloscope (TDS 3012B-Tektronix), which acquires and digitalizes waveforms, allowing them to be displayed, manipulated, and stored.

Two different kinds of Panametrics transducers were used: a non-polarized transducer couple and an S-polarized transducer couple. The first couple was used in order to acquire the ultrasonic waveform and thereafter to study and quantify the signal in the time domain. The second ultrasonic transducer couple was employed exclusively to measure the S-wave propagation velocity. A visco-elastic couplant was used to achieve good coupling between the transducer and the sample. The frequency of both transducer couples is centred in 1 MHz. Three different ultrasonic parameters were computed from each registered waveform: ultrasonic P-wave velocity (V_p), ultrasonic S-wave velocity (V_s), and spatial attenuation (α_s). P-wave velocity (V_p) is the most widely used ultrasonic parameter, and it was determined from the ratio of the length of the specimen to the transit time of the pulse. The obtained mean values (plus or minus standard deviation) for the 24 tested intact samples were 3.95 ± 0.17 km/s and 2.31 ± 0.12 km/s for the V_p and V_s velocities, respectively, which correspond to a "Medium" velocity range according to Anon (1979).

Spatial attenuation (α_s) quantifies the energy lost during wave propagation through a material. This quantification was performed by comparing the amplitude of the signal emitted (A_e) by the transmitter sensor and the amplitude recorded (A_{mx}) in the signal received by the receptor sensor (Martinez-Martinez et al. 2011). Moreover, spatial attenuation was normalized with respect to the distance between transmitter and receptor sensors (L). α_s (dB/cm) was then calculated according to the next expression:

$$\alpha_s = 20\frac{\log\left(\frac{A_e}{A_{mx}}\right)}{L} \quad (10)$$

The ultrasonic parameters, ultrasonic P-wave velocity (V_p) and ultrasonic S-wave velocity (V_s), have been used to compute the dynamic modulus of the specimens, Young's modulus (E_{dyn}) and Poisson's ratio (v_{dyn}), according to Eqs. (2) and (3).

Uniaxial compressive strength test

For the mechanical tests, an HBM Spider 8 600 Hz device was used jointly with HBM strain gauges (120 Ω, K = 2.1) and Catman v.5.0 analysis software. Longitudinal and transverse strain values were obtained for each loading cycle, up to a maximum value when the applied load is equal to 40 % of the sample ultimate load as specified by the suggested test method (ISRM 1979) for the secant Young's modulus and corresponding Poisson's ratio. A press machine of 200 kN capacity was used for booth compressive strength and elastic properties tests.

Results: relationship between static and dynamic elastic modulus

Figure 2 shows the velocities of P and S waves versus heating temperature for the 24 tested specimens. As it can be seen, there exists a linear trend of both velocities (v_p and v_s) being inversely proportional to temperature (T), with a high coefficient of determination, R^2 [Eqs. (11), (12); Fig. 2]:

$$v_p = 4.291 - 0.004T \quad (11)$$

$$v_s = 2.519 - 0.002T \quad (12)$$

The water-cooled samples show lower propagation velocities for the different temperatures because quick water cooling induces a greater degree of weathering. This weakening and its effect in the wave propagation velocity is typically due to micro-fissuration of calcite crystals.

Note that, although there are two different origins for the dispersion values of E_{dyn} (i.e. the dispersion values of the intrinsic variability from a rock sample to another and the measurement error), only the measurement error of the time of flight for the ultrasonic wave can be computed. In the performed test, the instrumental error is determined by the error in the measurement of the time of flight through the specimen which is up to ±200 ns for the used instruments. Consequently, considering the length and the bulk density of our samples, the error in the estimation of the time leads to an error in the measurement of the velocity which depends on its magnitude. In this case, for the specimen with higher measured velocity values (i.e. with a lower degree of deterioration), it reached 4.114 km/s for the P-wave, and 2.279 m/s for the S-wave; hence the estimation errors for these velocities are ±27 and ±8 m/s. The velocities for the specimen with the lowest measured values (i.e. with a higher degree of deterioration) were 1.491 km/s for the P-wave, and 0.972 m/s for the S-wave, and hence the estimation errors for these velocities are ±4 and ±1 m/s. Thus, considering Eq. (2) these values allow

Author Proof
UNCORRECTED PROOF

Journal : Large 10064 Dispatch : 3-3-2014 Pages : 9
Article No. : 583 LE TYPESET
MS Code : BOEG-D-13-00162 CP DISK

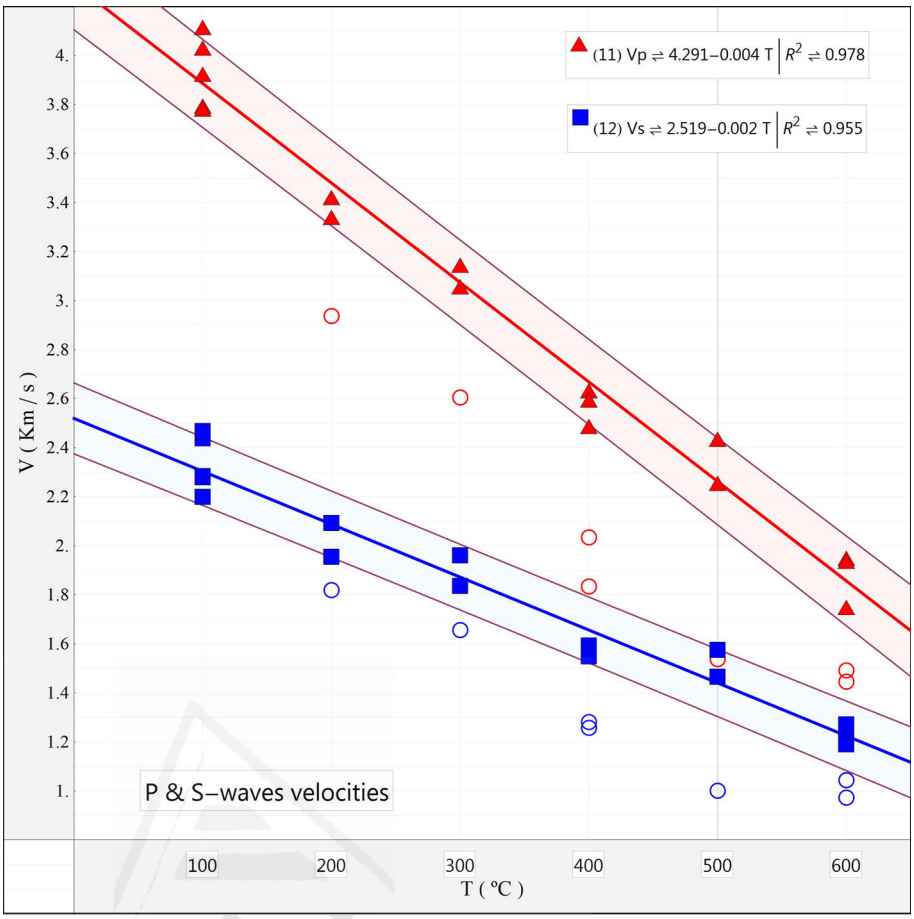


Fig. 2 P (*triangles*) and S (*squares*) wave velocities (V_p and V_s) versus heating temperature (T) of air-cooled samples. Note that *circles* correspond to P and S wave velocities of water-cooled specimens. The decrease of velocity is typically due to micro-fissuration of calcite crystals

the determination of an error in the computed module which varies between ±0.24 and ±0.02 GPa (with an average value of ±0.11 GPa).

Figure 3 shows the plot of the 24 static and dynamic elastic modules of the different tested samples (blue points) superimposed to the different relationships proposed by the authors cited in the introduction section. As can be seen, all the determined moduli for the San Julián's stone are lower than 50 GPa and are comprised between the two correlations proposed by Eissa and Kazi (1988). k equal to 1 line divides the plotted area, so that the underneath area represents the cases in which the dynamic values are higher than the static. This situation occurs for all samples analysed in this work. We can observe an outlier only in higher values. The obtained elastic modulus and dynamic modulus of each sample have been represented and the best fitting curve has been obtained by means of a least square fitting.

Obtained k-values vary from 1.13 to 2.29. Other authors obtained values between 0.85 and 1.86 (King 1983; Vanheerden 1987; Eissa and Kazi 1988; Al-Shayea 2004) or attributed the differences to natural dispersion of the tested samples and not to the test type (static or dynamic) ($k = 1$) (Ciccotti and Mulargia 2004). Martinez-Martinez et al. (2012) found k-values between 0.5 and 2.1 for carbonate rocks subjected to different aging conditions. This fact implies that the E_{dyn} measured at 1 MHz can range from a half to more than double the mechanical tests measured E_{st}.

In this study the obtained dynamic modulus measured at 1 MHz varied from 30.8 to 4.2 GPa for intact and aged rock samples, respectively, showing a clear dependence of the modulus on aging. The corresponding maximum and minimum static moduli are 24.2 and 2.0 GPa, respectively.

Table 4 shows the correlation coefficient matrix, which shows some significant correlations between the considered parameters. The functions used for the least squares fit are linear in the first five rows and columns (coefficients in bold). In the remaining rows and columns, different functions are used (coefficients in italic).

From Table 4 two strong correlations can be derived. The first one corresponds to the linear correlation between static modulus and dynamic modulus (both in GPa) that provides a coefficient of determination 0.961:

$$E_{st} = 0.867\, E_{dyn} - 2.085 \qquad (13)$$

The second significant correlation provides a decimal logarithm relationship between the static modulus (in GPa),

Journal : Large 10064 | Dispatch : 3-3-2014 | Pages : 9
Article No. : 583 | LE | TYPESET
MS Code : BOEG-D-13-00162 | CP | DISK

Author Proof

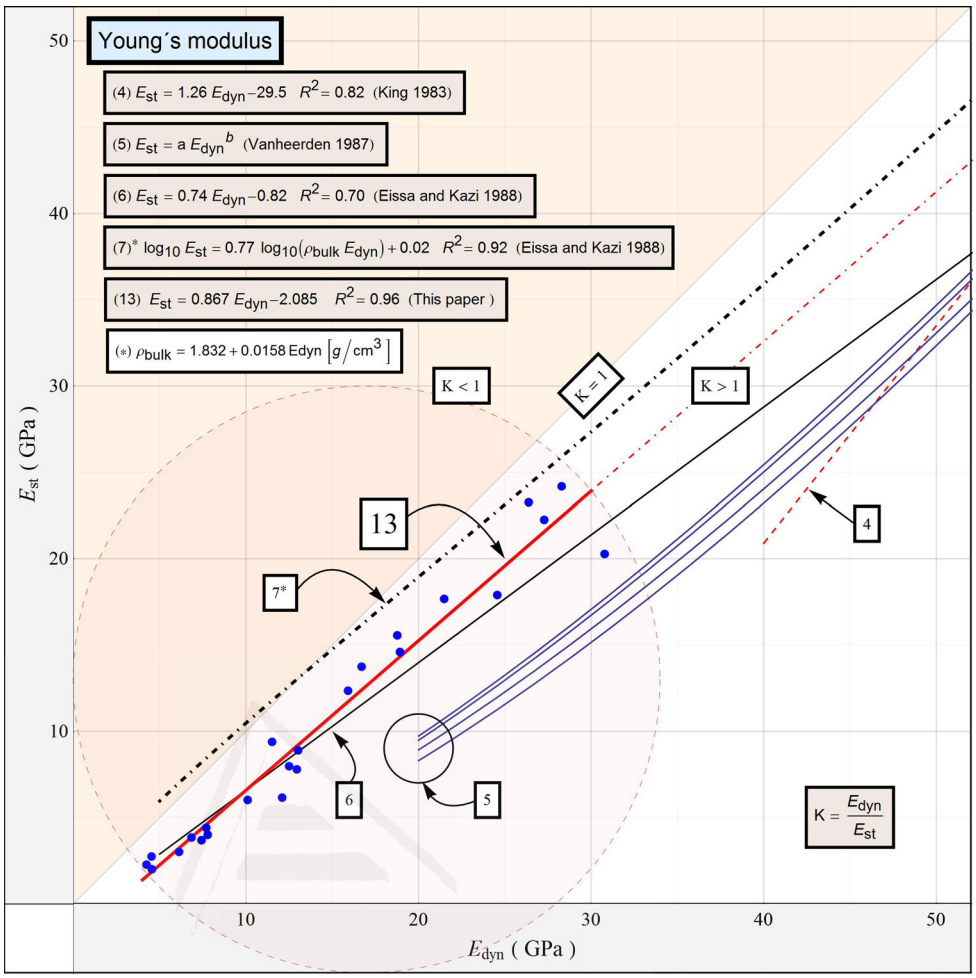


Fig. 3 Representation of the elastic and dynamic Young's modulus relationships proposed by different authors (see Table 1) for low elasticity range (lower than 50 GPa). The relationships have been only represented for their range of validity. *Blue* points correspond to the tested samples

Table 4 Matrix of correlation coefficients

R^2	k	E_{st}	E_{dyn}	α_s	ρ_{bulk}	$m\ \alpha_s^n$	$\log_{10} E_{st}$	$\log_{10}(\rho_{bulk}, E_{dyn})$
k	**1.000**	**0.686**	**0.5687**	**0.272**	**0.074**	*0.268*	–	–
E_{st}		**1.000**	**0.961**	**0.397**	**0.035**	*0.462*	–	–
E_{dyn}			**1.000**	**0.404**	**0.007**	*0.458*	–	–
α_s				**1.000**	**0.001**	–	–	–
ρ_{bulk}					**1.000**	*0.001*	–	–
$m\ \alpha_s^n$						*1.000*	–	–
$\log_{10} E_{st}$							*1.000*	***0.968***
$\log_{10}(\rho_{bulk}, E_{dyn})$								*1.000*

The fitted functions for the first five columns are linear (coefficients in bold). For the remaining columns the fitted functions are non-linear (in italic)

the bulk density (in kg m^{-3}), and the dynamic modulus (in GPa) with a coefficient of determination of 0.968, similar to that proposed by Eissa and Kazi (1988):

$$\log_{10} E_{st} = 1.275 \log_{10}(\rho_{bulk} E_{dyn}) - 4.714 \qquad (14)$$

Note that these two correlations have been computed for a calcarenite rock and for low dynamic modulus values (i.e. E_{dyn} from 4 to 30 GPa). Figure 4 shows the plot of the 24 tested samples jointly with the proposed equations [Eqs. (13, 14)]. Regardless of the high value of the coefficient of determination, the residuals randomly dispersed around the horizontal axis indicate that a linear regression model is appropriate for the data. The confidence interval bands of 80 and 95 % are also plotted. The blue dashed line shows the Eq. (14) or nonlinear fit. Since the correlation between density and dynamic modulus found in our tests is very poor, we estimate Eq. (13) is more appropriate than (14) in this case;moreover that the trend of Eq. (14) extrapolated to high dynamic modulus values differs from that shown in Fig. 1.

Author Proof
UNCORRECTED
Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Journal : Large 10064 Dispatch : 3-3-2014 Pages : 9
Article No. : 583 LE TYPESET
MS Code : BOEG-D-13-00162 CP DISK

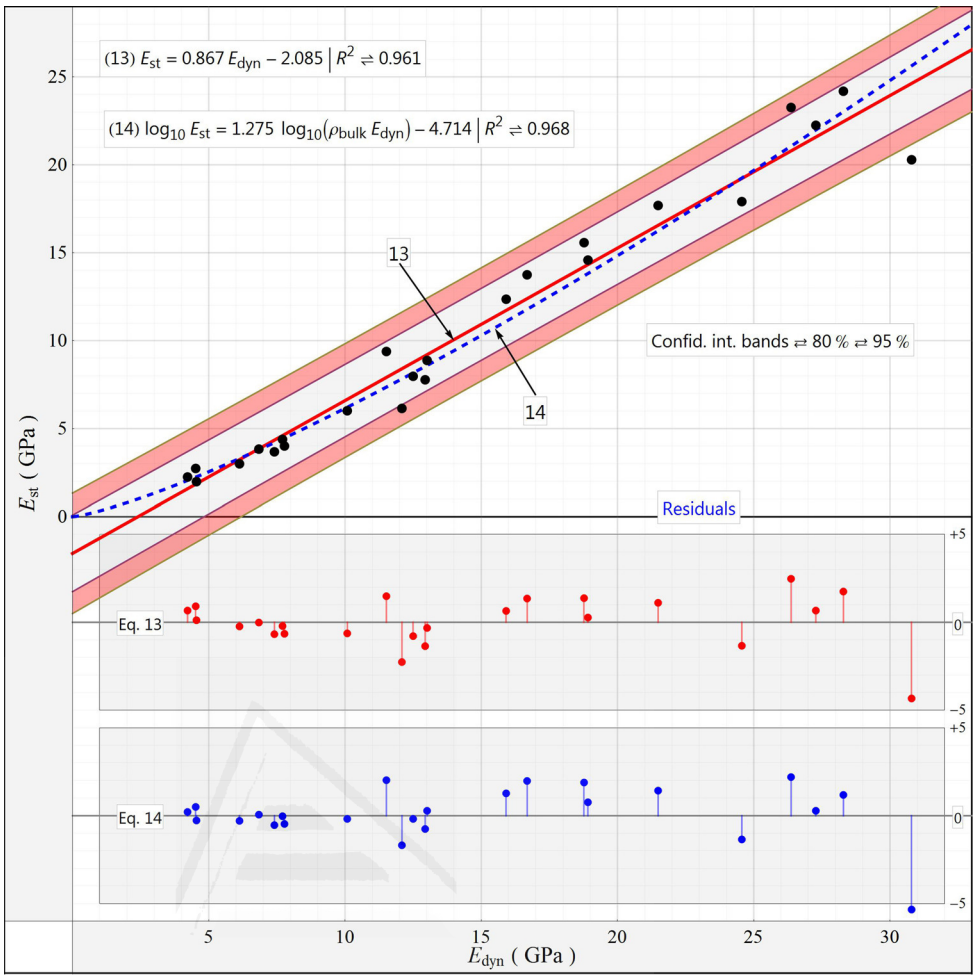


Fig. 4 Linear (Eq. 13) (*red line*) and nonlinear (Eq. 14) (*blue-dashed line*) fitting of the data (*black points*), confidence interval bands (*grey and red shading*), and residuals plot (*blue and red points*)

Conclusion

Generally low elastic modules imply highly fissured or damaged rocks. The mechanical properties, including static modulus, are highly dependent on the size, orientation, and spatial distribution of these cracks. Some studies have shown that P-wave velocity exhibits low sensitivity to these physical characteristics (Martinez-Martinez et al. 2011). This conclusion implies that rocks with different types of cracking, and therefore different values for static and elastic modulus, are, apparently, not different from the viewpoint of the dynamic modulus. This also means that dynamic modulus cannot be used to correct k values. For San Julián's stone it seems to be different. This may be due to the fact that the poor mechanical properties of the studied rock are, essentially, not due to the cracks, but to the weakness of the rock matrix. This same feature makes the fatigue cracks occur in the entire cross section and over the entire body with no preferred orientation, which affects both the mechanical tests and ultrasonic wave propagation. This provides a good correlation between the static modulus and the dynamic modulus. The studied calcarenite behaves differently from metamorphic carbonated rocks. The general trends in the published works for both non-linear and linearadjustments show that the higher the dynamic modulus is, the lower the k values are (Fig. 1). So for very high modulus, k value approaches to one. This is consistent with the fact that very high values of the elastic modulus indicate very compact rocks with a very low porosity, not cracked, and with minimal features able to differentially affect the static and dynamic testing.

The Eqs. (7) and (14) which take into account the bulk density of the material seem to better fit the observations over the entire band of modulus, from low to very high values, but present the disadvantage that, for representing the full band, a correlation between bulk density and dynamic modulus must to be assumed . Moreover, bulk density does not vary continuously over the range (this question will be the aim of further studies). For very high dynamic modulus, the correction that the bulk introduces provides predictions of k near one, which is consistent with other studies (King 1983; Vanheerden 1987; Eissa and

Journal : Large 10064 Dispatch : 3-3-2014 Pages : 9
Article No. : 583 LE TYPESET
MS Code : BOEG-D-13-00162 CP DISK

Author Proof
Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Kazi 1988; Al-Shayea 2004; Ide 1936). For those applications in which it is necessary to study the same type of rock under different weathering degrees, it may be more convenient to use a linear adjustment, as in Eq. (13), for the 4–30 GPa band, ranging from intact rock to very weakened rock. In these cases, bulk density exhibits a low variation, and it is not directly related with the deterioration of mechanical properties. Note that equations similar to (13) also implicitly include the bulk density because the dynamic elastic modulus depends on it [see Eq. (2)]. However, equations similar to (14) are expressed as a function of the square of the bulk density.

Summarizing, it is concluded that static modulus can be obtained from dynamic tests, as shown in Eq. (13) for the studied range (i.e. Edyn values lower than 50 GPa) and for soft rocks. Furthermore, the dynamic modulus (i.e. ultrasonic wave velocity) has been found to be a good indicator of the material degree of deterioration, in this case poorly detected by other parameters such as the attenuation of the ultrasonic wave.

The obtained relationships will allow the computation of the static modulus of elements of cultural heritage of Alicante city made of San Julián's stone (e.g. Gravina Palace, Santa Bárbara Castle, City Council building, Lonja, Principal Theatre, Cathedral of St. Nicholas, Basilica of Santa María) from non-destructive field tests, for the analysis of the integrity level of historical constructions affected by high temperatures. Furthermore, these results can be extrapolated, performing the adequate adaptations, for building stones with similar properties.

Acknowledgments The authors would like to thank Dr. D. Benavente and Dr. J. Martínez from the Earth Sciences Department and Applied Petrology Laboratory from the University of Alicante for allowing us to perform ultrasonic tests on their laboratories and Dr. J. M. Ortega from the Department of Civil Engineering from the University of Alicante for kindly performing the mercury intrusion porosimetry test. The companies U.T.E. FCC Construcción, S.A. and Enrique Ortiz e Hijos Contratistas de Obras, S.A. provided the rock samples from the TRAM tunnel excavation. This work has been partially funded by the University of Alicante projects uausti11–11 and gre09–40, the Spanish National project BIA2012-34316, and the Generalitat Valenciana project gv/2011/044.

References

AENOR (2007) UNE-EN 1936: métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total. Asociación Española de Normalización y Certificación

Al-Shayea NA (2004) Effects of testing methods and conditions on the elastic properties of limestone rock. Eng Geol 74(1–2):139–156. doi:10.1016/j.enggeo.2004.03.007

Anon (1979) Classification of rocks and soils for engineering geological mapping part I: rock and soil materials. Bull Int Assoc Eng Geol 19(1):364–371. doi:10.1007/bf02600503

Brotons V, Ivorra S, Martínez-Martínez J, Tomás R, Benavente D (2013) Study of creep behavior of a calcarenite: San Julián's stone (Alicante). Mater Constr 62(312). doi:10.3989/mc.2013.06412

Ciccotti M, Mulargia E (2004) Differences between static and dynamic elastic moduli of a typical seismogenic rock. Geophys J Int 157(1):474–477. doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02213.x

Dunham RJ (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. Mem Am Assoc Pet Geol 1:108–121

Eissa EA, Kazi A (1988) Relation between static and dynamic Young's Moduli of rocks. Int J Rock Mech Min Sci 25(6):479–482. doi:10.1016/0148-9062(88)90987-4

Ide JM (1936) Comparison of statically and dynamically determined young's modulus of rocks. Proc Natl Acad Sci USA 22:81–92. doi:10.1073/pnas.22.2.81

ISRM (1977) Suggested method for petrographic description of rocks. ISRM Suggest Methods 15:41–45

ISRM (1979) SM for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. ISRM Suggest Methods 2:137–140

King MS (1983) Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian shield. Int J Rock Mech Min Sci 20(5):237–241. doi:10.1016/0148-9062(83)90004-9

Kjartansson E (1979) Constant Q-wave propagation and attenuation. J Geophys Res 84(NB9):4737–4748. doi:10.1029/JB084iB09p04737

Kolesnikov YI (2009) Dispersion effect of velocities on the evaluation of material elasticity. J Min Sci 45(4):347–354

Louis Cereceda M, Garcia-del-Cura MA, Spairani Y, de Blas D (2001) The civil palaces in Gravina Street, Alicante: building stones and salt weathering. Mater Constr 51(262):23–37

Martin JD (2004) Using XPowder: a software package for powder X-ray diffraction analysis. DL GR doi:1001/04 ISBN: 84-609-1497-6:105

Martinez-Martinez J, Benavente D, Garcia-del-Cura MA (2011) Spatial attenuation: the most sensitive ultrasonic parameter for detecting petrographic features and decay processes in carbonate rocks. Eng Geol 119(3–4):84–95. doi:10.1016/j.enggeo.2011.02.002

Martinez-Martinez J, Benavente D, Garcia-del-Cura MA (2012) Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks. Bull Eng Geol Environ 71(2):263–268. doi:10.1007/s10064-011-0399-y

Montenat C (1977) Les basins néogènes et quaternaries du Levant d'Alicante à Murcie (Cordillères Bétiques orientales, Espagne). Stratigraphie, paléontologie et evolution dynamique. Doc Lab Geol, Univ Lyon 69, 345 pp

Montenat C, Ott d'Estevou P, Coppier G (1990) Les basins néogènes entre Alicante et Cartagena. Doc Et Trav IGAL 12–13:313–368

Vanheerden WL (1987) General relations between static and dynamic moduli of rocks. Int J Rock Mech Min Sci 24(6):381–385

Author Proof

UNCORRECTED PROOF

Journal : Large 10064 | Dispatch : 3-3-2014 | Pages : 9
Article No. : 583 | ☐ LE | ☐ TYPESET
MS Code : BOEG-D-13-00162 | ☑ CP | ☑ DISK

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante