

# Reducción de la resistencia por aumento de la temperatura en una granodiorita de una zona arqueológica afectada por incendios

*Temperature-related strength decrease in a granodiorite from an archaeological area affected by fires*

Alejandra Sánchez-Roda<sup>1</sup>, Miguel Gómez-Heras<sup>1</sup> y Belén Oliva-Urcia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid. [miguel.gomezheras@uam.es](mailto:miguel.gomezheras@uam.es), [alejandra\\_2396@hotmail.com](mailto:alejandra_2396@hotmail.com)

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza. [boliva@unizar.es](mailto:boliva@unizar.es)

## ABSTRACT

*Fires are one of the main threats for Natural and Cultural Heritage. The sudden temperature change during a fire promotes the decrease of the mechanical strength of rocks. This paper evaluates the mechanical effects generated during high temperatures in samples of a granodiorite related with the archaeological site of "El Berrueco (Ávila – Salamanca). Results show a decrease of mechanical properties, which is minor up to 400°C and pervasive and catastrophic at 600°C and above.*

**Key-words:** Fire, heritage, non-destructive testing, ultrasound velocity, Leeb hardness

*Geogaceta*, 73 (2023), 75-78

<https://doi.org/10.55407/geogaceta95403>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

## Introducción

En la Unión Europea, se quemaron en 2019 más de 400.000 ha de espacios naturales, donde aproximadamente un 48% del terreno pertenecía a áreas protegidas por la Red Natura 2000. Durante ese mismo año se quemaron en España un total de 93.962 hectáreas de superficie forestal y 85.369 ha durante 2021. En 2020 la superficie descendió hasta 29954 ha, debido a la situación particular provocada por la pandemia de COVID 19 ya que, aunque el fuego es un fenómeno inherente al clima mediterráneo, a lo largo de los años se ha puesto de manifiesto que la intervención humana es una causa clave de los incendios en España, donde un 95% de estos tienen un origen antrópico, ya sea directa o indirectamente (Verdú y Salas, 2011; López y López, 2019).

España es, junto con Portugal, el país con mayor número de incendios y superficie quemada de toda Europa (San Miguel-Ayán et al., 2019), con especial incidencia en Galicia, Asturias y noroeste de Castilla y León y grandes incendios como los recientes de Navalacruz en 2021

(aprox. 22.000 ha) o la Sierra de la Culebra en 2022 (más de 30.000 ha) muestran el alcance de los incendios forestales como uno de los mayores agentes catastróficos de degradación más graves para el Patrimonio Natural y Cultural; destacando en este último el patrimonio arqueológico construido en piedra, que a menudo se sitúa en zonas rurales y despobladas, especialmente susceptibles a verse afectada por estos eventos.

Así, por ejemplo, según las estimaciones de la Dirección General de Patrimonio Cultural de Castilla, en el incendio de Navalacruz (Ávila) se vieron afectados 34 elementos de patrimonio arqueológico, de los cuales tres están catalogados como Bienes de Interés Cultural. Estos eventos cada vez están alcanzando mayor magnitud debido al calentamiento global climático y a la frecuencia creciente de eventos meteorológicos extremos que, hacen cada vez más comunes los grandes incendios "inextinguibles" o de sexta generación.

A esto se añade, en un contexto internacional, la existencia de conflictos bélicos en los cuales los incendios sobre bienes patrimoniales son frecuentes en

## RESUMEN

*Los incendios suponen una de las mayores causas de destrucción del Patrimonio Natural y Cultural. El aumento brusco de temperatura durante un incendio provoca la reducción de la resistencia mecánica de las rocas. El presente trabajo evalúa los efectos mecánicos generados por las altas temperaturas en una granodiorita relacionada con el yacimiento arqueológico de El Berrueco (Ávila – Salamanca). Los resultados muestran un descenso en las propiedades mecánicas del material, que es menor hasta 400°C y catastrófico y penetrativo a partir de 600°C.*

**Palabras clave:** Incendios, patrimonio, técnicas no destructivas, velocidad de propagación de ultrasonidos, dureza Leeb,

Fecha de recepción: 05/07/2022

Fecha de revisión: 28/10/2022

Fecha de aceptación: 02/12/2022

tre otros daños producidos (Mol et al., 2017; Mol y Gómez-Heras, 2018).

Así, aunque existen diversos estudios recientes sobre los efectos del fuego en las rocas en un contexto patrimonial (p.ej. Sanjurjo-Sánchez et al., 2016; Vázquez et al., 2016; Vigroux et al., 2021; Vázquez et al., 2022), es importante seguir profundizando en la caracterización y comprensión de los procesos de degradación que ocurren en las rocas durante el aumento de temperatura producido durante un incendio.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de las altas temperaturas, mediante técnicas no destructivas y en condiciones controladas, en las propiedades mecánicas de una granodiorita relacionada con la zona arqueológica de El Berrueco (Ávila – Salamanca) que sufrió un incendio en agosto de 2017.

## Zona de estudio y metodología

El área de estudio de este trabajo se centra en la zona arqueológica de El Berrueco, situado entre las provincias de Ávila y Salamanca (fig. 1), gracias a la

documentación proporcionada por la Dirección General de Patrimonio de la Consejería de Cultura de la Junta de Castilla y León. Este lugar sufrió un incendio en agosto de 2017, que estuvo activo durante dos días y afectó a siete yacimientos arqueológicos, tal y como se detalla en el Informe Técnico de la Prospección



**Fig. 1.- Ubicación del Cerro del Berrueco en Castilla y León.**

*Fig. 1.- Location of Cerro del Berrueco in Castilla y Leon.*

Arqueológica de El Berrueco (Jiménez González, 2017).

Se tomó un bloque de la misma granodiorita que aflora en la zona quemada pero alejada de esta (para no dañar el entorno arqueológico y asegurar que la muestra no hubiese sido alcanzada por el fuego). La granodiorita fue posteriormente cortada para obtener cubos similares de unos 4 cm de lado. Tras esto, se seleccionaron 15 muestras para calentarlas a diferentes temperaturas mediante un horno SNOL 30/1300, y 3 más que se dejaron como blancos sin calentar.

Las muestras se secaron a 40°C hasta peso constante, se pesaron y se midieron para luego realizar los siguientes análisis antes de ser calentadas en el horno:

**Dureza superficial Leeb:** La dureza Leeb es una técnica de dureza al impacto que mide la desaceleración de un cuerpo percutor sobre la superficie del material.

Las medidas se realizaron con un equipo Equotip "piccolo" 2 (Proceq) con un cuerpo de impacto tipo D (11Nmm) (cinco medidas por cara). La medida de la dureza superficial Leeb D (LHD) es adimensional.

Velocidad de propagación de ultrasonidos (UPV): con un equipo Pundit (Proceq) con transductores de 250 KHz (una medida para cada eje) junto con la distancia entre caras (tres medidas por cada par de caras). Este instrumento mide la velocidad de llegada de las ondas P, que son las que más rápido se transmiten.

Se calentaron tres bloques con una rampa de calentamiento de 10 °C/min para cada una de las distintas temperaturas (200, 400, 600, 800 y 1.000°C) manteniendo la temperatura seleccionada durante tres horas. Los bloques se pesaron a la salida del horno en una balanza. Una vez enfriados, se volvieron a tomar las medidas realizadas anteriormente, para valorar los cambios producidos con la temperatura.

A partir de los datos adquiridos se calculó el índice de anisotropía de la velocidad de propagación de ultrasonidos mediante el índice propuesto por Guyader y Denis (1986) para la anisotropía total (dM%), considerando los tres ejes del espacio. Cada índice indica en qué dirección espacial está concentrada la orientación textural y/o mineralógica que condiciona la anisotropía (Fort González et al., 2008). La ecuación de este índice es:

$$dM\% = (1 - 2V_1/(V_2 + V_3)) \times 100$$

Donde  $V_1$  es el valor mínimo de los obtenidos para cada eje,  $V_2$  el máximo y  $V_3$  el intermedio de los anteriores. A partir de los datos obtenidos para cada bloque, se realizó la media y desviación típica para obtener los índices de anisotropía para cada temperatura.

Además, se calculó también la resistencia a compresión simple (UCS, por sus siglas en inglés) a partir de LHD y UPV de

acuerdo con la ecuación propuesta por Gómez-Heras et al. (2020):

$$UCS = 10^{-3,176} \times LHD^{1,283} \times UPV^{0,445}$$

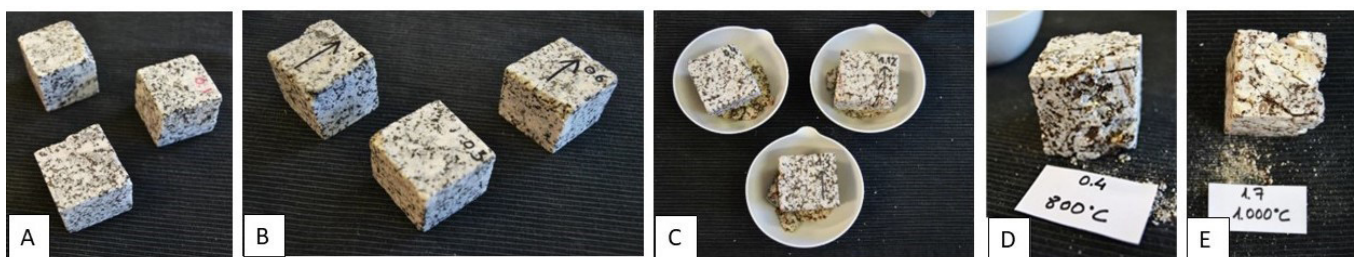
## Resultados

La roca utilizada para los ensayos corresponde con una granodiorita biotítica porfídica de grano medio con megacristales abundantes que aflora en bolos poco redondeados con superficie rugosa e irregular (López Sopena et al., 1996). Su mineralogía es cuarzo, biotita en cristales finos aislados y fenocristales de feldespato potásico que, en ocasiones, tienen los bordes poco definidos. Esta granodiorita tiene unas orientaciones muy marcadas por los fenocristales de feldespato potásico, lo que se expresa en cierta anisotropía en las propiedades del material.

La fracturación y el cambio de color de las rocas son los efectos macroscópicos más notables tras el calentamiento (fig. 2). En las muestras calentadas a 600°C y por encima de esta temperatura, los cristales de biotita muestran cierto brillo metálicos. La fracturación es especialmente intensa en las muestras calentadas a 600°C y por encima de esta temperatura, cuando las rocas se vuelven fácilmente disgregables.

A partir del peso y la dimensión de los cubos para las muestras sin calentar y una vez calentadas se ha determinado la densidad ( $\rho$ ) y su descenso en relación con los valores iniciales (fig. 3). Se observa como el descenso de densidad es despreciable hasta las muestras calentadas a 400°C, leve en las muestras calentadas a 600°C y muy notable en las muestras calentadas a 800 y 1.000°C.

El resto de los resultados se han representado mediante gráficos de cajas y bigotes donde estos últimos representan los valores máximos y mínimos, el tamaño de las cajas indica el valor del cuartil 1 y el 3, la línea intermedia el cuartil 2 (que



**Fig. 2.- Aspecto macroscópico de las rocas ensayadas la salida del horno tras el calentamiento a 200°C (A), 400°C (B), 600 °C (C), 800 °C (D) y 1.000 °C (E). Ver figura en color en la web.**

*Fig. 2.- Macroscopic aspect of the tested samples as they were removed from the oven after heating at a 200°C (A), 400°C (B), 600 °C (C), 800 °C (D) and 1.000 °C (E). See color figure in the web.*

Temperatura	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\Delta\rho$ (%)
25 °C	3.07 ± 0.09	—
200 °C	3.06 ± 0.07	0.33
400 °C	3.06 ± 0.04	0.33
600 °C	2.95 ± 0.02	3.91
800 °C	2.59 ± 0.01	15.64
1.000 °C	2.68 ± 0.17	12.70

**Fig. 3.- Densidad media ( $\rho$ ) de los cubos calculada tras ser calentados a distintas temperaturas e incremento en % con respecto al valor inicial.**

*Fig. 3.- Average density ( $\rho$ ) of the cubes after heating at different temperatures and its increment in % in relation with the initial value.*

coincide con la mediana) y la X marca el valor medio.

Los valores de LHD muestran una variación menor del 10% en las muestras calentadas a temperaturas inferiores a 600°C (fig. 4) mientras que en las muestras calentadas hasta esta temperatura se observa un fuerte descenso reduciéndose los valores medios prácticamente hasta la mitad. En las muestras calentadas hasta 800 y 1000 °C, no se pueden obtener valores de dureza a causa de la fracturación de la roca, ya que el equipo no puede realizar medidas cuando la rugosidad superficial es muy elevada.

Las medidas de UPV muestran un descenso exponencial a medida que aumenta la temperatura (fig. 5). Como en el caso de la dureza superficial, la UPV no puede medirse en las muestras calentadas a 800 y 1.000 °C.

Con relación a los índices de anisotropía calculados a partir de los valores

Temperatura (°C)	dM (%)
25	6 ± 2
200	9 ± 3
400	15 ± 7
600	41 ± 14

**Tabla I.- Índice de anisotropía con la temperatura**

*Table I.- Anisotropy index after heating at the test temperatures.*

de UPV (Tabla I), esta aumenta notablemente con la temperatura.

La UCS calculada se ha clasificado según los valores propuestos por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas - ISRM (Brown, 1981). La UCS apenas cambia en las muestras calentadas a 200°C (tabla II), para descender hasta

T (°C)	UCS (MPa)	Clasificación ISRM
25	124 ± 4	Alta
200	121 ± 3	Alta
400	100 ± 5	Alta/media
600	30 ± 7	Moderada

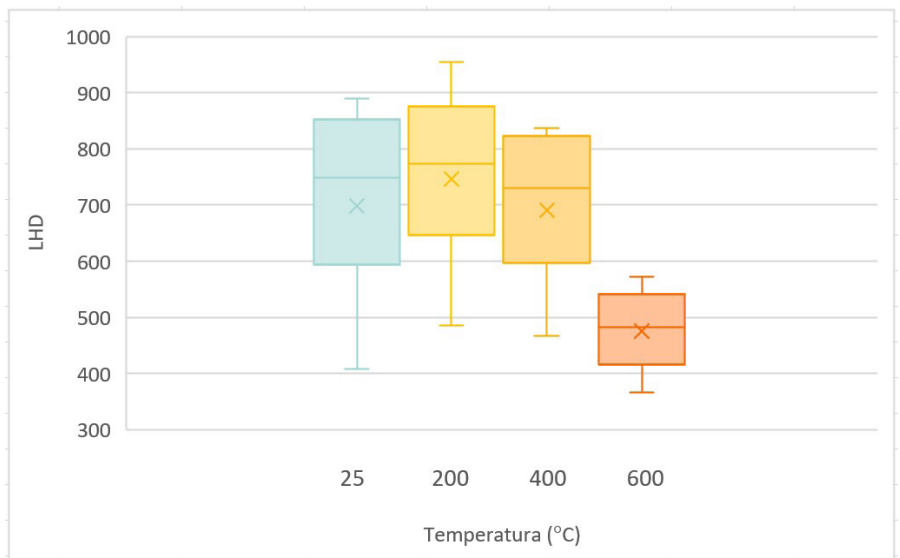
**Tabla II.- UCS calculada y clasificación ISRM tras las distintas temperaturas de calentamiento.**

*Table II.- Calculated UCS and ISRM classification after heating at different temperatures.*

cerca del 70% después del calentamiento a 600°C.

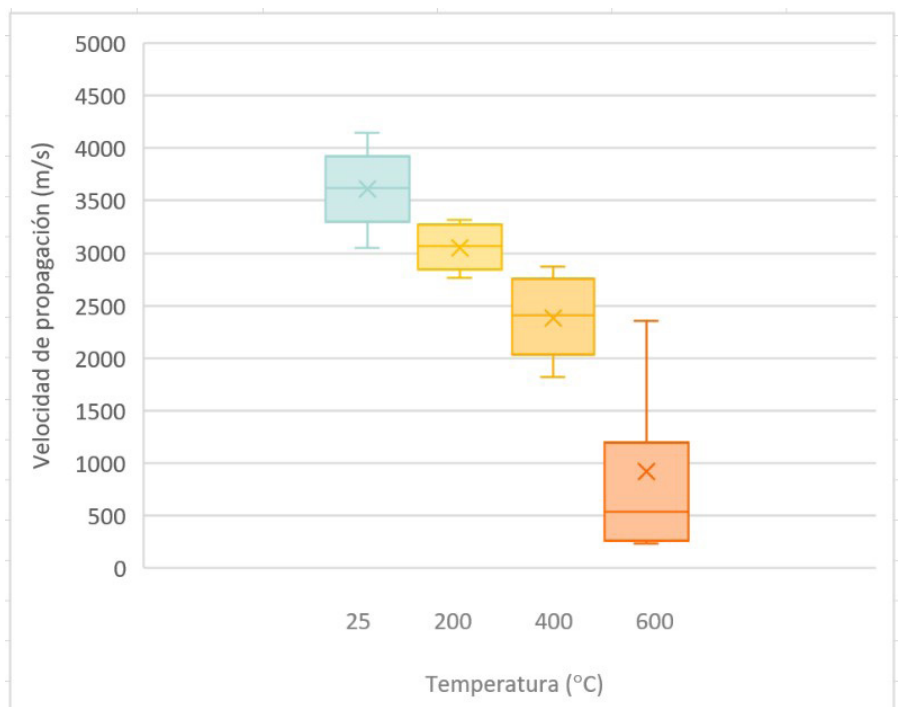
**Discusión**

Los resultados obtenidos muestran un descenso de la resistencia mecánica de la roca según aumenta la temperatura, aunque en distinto grado como reflejo de los distintos procesos de fracturación que sufre la roca a medida que se calienta. Estos procesos corresponden a la formación, a temperaturas más bajas, de fracturas intergranulares debidas a



**Fig. 4.- Dureza al rebote LHD de las muestras en función de las temperaturas a las que se calentaron.**

*Fig. 4.- LHD rebound hardness of the samples in relation with the temperature.*



**Fig. 5.- UPV de las muestras en función de las temperaturas a las que se calentaron.**

*Fig. 5.- UPV of the samples in relation with the temperature.*



un descenso en la fuerza de unión en los bordes de grano, lo que provoca que en las muestras calentadas hasta los 400°C los cambios sean leves y que descienda UPV sin que disminuya LHD. En las muestras calentadas a 600°C y por encima se multiplica la formación de fracturas intra y transgranulares.

Esta formación catastrófica y penetrativa de fracturas se interpreta como el resultado de la transformación del cuarzo  $\alpha$  en  $\beta$  a los 573°C que supone un cambio de volumen de los cristales de cuarzo de un 2% (Sirdesai et al., 2019) que se suma a la expansión térmica de los granos minerales (Chaki et al., 2008; Vázquez et al., 2022).

## Conclusiones

Los resultados muestran que esta granodiorita presenta unos cambios mecánicos poco notables al ser calentada por debajo de los 400°C. Entre 400 y 600°C se produce un fenómeno acusado de fracturación, relacionado con la transformación del cuarzo  $\alpha$  en  $\beta$  a 573°C.

Por encima de 600°C, la fracturación de la roca es catastrófica e imposibilita la toma de medidas con el equipamiento disponible en las temperaturas más altas.

## Contribución de los autores

Sánchez-Roda (adquisición de datos, edición, figuras, revisión del manuscrito, investigación/análisis). Gómez-Heras (Estructura del trabajo, metodología, adquisición de datos, análisis, revisión del manuscrito, coordinación, supervisión). Oliva-Urcia (Estructura del trabajo, metodología, adquisición de datos, análisis, revisión del manuscrito, coordinación,

supervisión).

## Agradecimientos

A la D. G. de Patrimonio de la Consejería de Cultura de la Junta de Castilla y León por la documentación suministrada y los permisos obtenidos. Este trabajo ha sido financiado por los Proyectos TOP-Heritage de la Comunidad de Madrid (S2018/NMT\_4372) y los proyectos PIC2020-116896RB-C21 y PIC2020-116896RB-C22 del MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

## Referencias

- Brown, E.T. (1981). *Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods*. Pergamon press, Oxford, 211 p.
- Chaki, S., Takarli, M. y Agbodjan, W. P. (2008). *Construction and Building Materials* 22(7), 1456-1461. <https://doi.org/ckvjcr>
- Fort González, R., Varas, M.J., Álvarez de Buergo, M. y Tabora, M. (2008). *Materiales de construcción* 289-290, 161-178. <https://doi.org/b7pfph>
- Gómez-Heras, M., Benavente, D., Pla, C., Martínez-Martínez, J., Fort, R. y Brotons, V. (2020). *Construction and Building Materials* 261, 119996. <https://doi.org/h3z8>
- Guyader, J. y Denis, A. (1986). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 33(1), 49-55.
- Jiménez González, M.C. (2017). *Informe Técnico de la Prospección Arqueológica de El Berruenco*. D. G. de Patrimonio Cultural de Castilla y León, 164 p.
- Koca, M.Y., Ozden, G., Yavuz, A.B., Kincal, C., Onargan, T. y Kucuk, K. (2006). *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 43(4), 520-530. <https://doi.org/b8x47n>
- Kompaníková, Z., Gómez-Heras, M., Michňová, J., Durmeková, T. y Vlčko, J. (2014). *Environmental earth sciences* 72(7), 2569-2581. <https://doi.org/f6hvnd>
- López Santalla, A. y López García, M. (Coord.) (2019). *Los incendios forestales en España. Decenio 2006-2015*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General Técnica. 166 p.
- López Sopena, F., Lillo Ramos, F.J., Díez Montes, A., Olive Davo, A., Rubio Campos, J.C. (1996). *Mapa geológico de España 1:50.000, hoja 553 (Béjar) y memoria*. IGME, Madrid, 122 p.
- Mol, L. y Gómez-Heras, M. (2018). *Heritage Science* 6(1), 1-16. <https://doi.org/h3z9>
- Mol, L., Gómez-Heras, M., Brassey, C., Green, O. y Blenkinsop, T. (2017). *Royal Society open science*, 4(2), 160335. <https://doi.org/gnw2x2>
- Sanjurjo-Sánchez, J., Gómez-Heras, M., Fort, R., Álvarez de Buergo, M., Benito, R. I. y Bru, M.A. (2016). *Microchemical Journal* 127, 247-255. <https://doi.org/f8pwpj>
- San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, R., Maianti, P. et al. (2019). *Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa*. EUR 30402 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 159 p. <https://doi.org/h3z5>
- Sirdesai, N.N., Mahanta, B., Ranjith, P.G. y Singh, T.N. (2019). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78(2), 883-897. <https://doi.org/gpxh8r>
- Vázquez, P., Acuña, M., Benavente, D., Gibeaux, S., Navarro, I. y Gómez-Heras, M. (2016). *Construction and Building Materials* 104, 263-275. <https://doi.org/h32b>
- Vázquez, P., Benavente, D., Montiel, D. y Gómez-Heras, M. (2022). *Applied Sciences* 12(1), 188. <https://doi.org/h3z6>
- Verdú, F., y Salas, J. (2011). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*.
- Vigroux, M., Eslami, J., Beaucour, A. L., Bourges, A., y Noumowé, A. (2021). *Construction and Building Materials* 272, 121629. <https://doi.org/h32c>