



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

**Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre
materiales estructurales y de sostenimiento.**

Autor: Ainara Flores Cordero

Tutora: Martina Inmaculada Álvarez Fernández

Cotutor: Celestino González Nicieza

Oviedo, Julio de 2018



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría mostrar mi agradecimiento en primer lugar a mi tutora Martina Inmaculada Álvarez Fernández y a mi cotutor Celestino González Nicieza por darme la oportunidad de formar parte del departamento e introducirme en el campo de la investigación, por su ayuda y su apoyo en todo momento y por sus ideas constantes sin las cuales no podría haber realizado este Trabajo Fin de Máster.

A Isabel Álvarez García por su incondicional apoyo durante todo el proceso de aprendizaje y por haber sabido guiarme y enseñarme todo lo que sabe durante estos meses.

A Inés García Álvarez por su incansable ayuda en el laboratorio.

Y a todas las personas que forman parte del departamento y dieron todo lo que estaba al alcance de su mano para ayudarme y enseñarme todo lo que sabían.

El trabajo se ha llevado a cabo gracias al Proyecto MINECO-17-BIA2015-72928-EXP del programa EXPLORA del Ministerio de Economía y Competitividad, con el que se ha financiado la adquisición de algunos de los equipos utilizados en el TFM.

A mis padres y en especial a mi hermana, Nagore, que pese a vivir en Bilbao ha sabido transmitirme todo el apoyo que necesitaba en los peores momentos. Ellos son mi mayor ejemplo de motivación ante las adversidades y de trabajo incesante hasta alcanzar la meta.

Y por último a Serguei por motivarme cada día para conseguir dar siempre lo mejor de mí.



Índice general

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	8
2.	ANTECEDENTES	10
2.1	La gunita sometida a vibraciones	10
2.2	La emisión acústica.....	14
3.	METODOLOGÍA PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	17
4.	DISEÑO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL	24
5.	DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS	27
5.1.	Prensa de carga universal manual.....	27
5.1.1.	Descripción del equipo	27
5.1.2.	Descripción del ensayo.....	32
5.2.	Prensa automática.....	34
5.2.1.	Descripción del equipo	34
5.2.2.	Descripción del ensayo.....	36
5.3.	Mesa generadora de vibraciones.....	38
5.4.	Acelerómetros	38
5.5.	Emisión acústica.....	40
5.5.1.	Componentes del equipo.....	40
5.5.2.	Conceptos básicos de la emisión acústica.....	43
5.5.3.	Desarrollo de las pruebas.....	44
5.6.	Sensores de temperatura	45
6.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	48
6.1.	Evolución de la resistencia a compresión simple con el tiempo de fraguado	49
6.2.	Evolución de la resistencia a tracción indirecta con el tiempo de fraguado ...	55
6.3.	Influencia de las vibraciones en la resistencia a tracción	64
7.	CONCLUSIONES	79
8.	BIBLIOGRAFÍA	81



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de proyección por vía seca. Fuente: S.I.K.A. (2009) Sistemas de Aplicación de productos Sika en el hormigón proyectado.	11
Figura 2. Sistema de proyección por vía húmeda. Fuente: S.I.K.A. (2009) Sistemas de Aplicación de productos Sika en el hormigón proyectado.	12
Figura 3. Sistema de proyección por vía semihúmeda. Fuente: S.I.K.A. (2009) Sistemas de Aplicación de productos Sika en el hormigón proyectado.	12
Figura 4. Arena utilizada.	17
Figura 5. Recipiente y tapa.	18
Figura 6. Recipiente, tapa y muestra húmeda.	19
Figura 7. Recipiente, tapa y muestra seca.	19
Figura 8. Cemento utilizado.	20
Figura 9. Acelerante empleado.	21
Figura 10. Arena preparada para realizar la mezcla de mortero.	21
Figura 11. Cemento preparado para realizar la mezcla de mortero.	22
Figura 12. Mezcla de todos los componentes.	22
Figura 13. Algunas de las probetas listas para fraguar.	23
Figura 14. Esquema general de los ensayos realizados.	26
Figura 15. Prensa manual.	27
Figura 16. Disposición de los equipos para realizar en ensayo de tracción indirecta. .	28
Figura 17. Probeta con sensor de emisión acústica.	33
Figura 18. Prensa automática.	34
Figura 19. Pantalla de inicio de la prensa automática.	35
Figura 20. Probeta de compresión lista para ensayar.	37
Figura 21. probeta en la mesa generadora de vibraciones.	38
Figura 22. Sensor de emisión acústica.	41



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



Figura 23. Tarjeta de adquisición Micro-SHM	42
Figura 24. Amplificador	42
Figura 25. probeta tracción lista para ensayar con sensor de emisión acústica	44
Figura 26. Gráfica tipo de energía absoluta (probeta 7.2.).	45
Figura 27. Comet, data logger	46
Figura 28. Probeta 4.3.	64



ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Aceleración medida en el eje z.	39
Gráfica 2. Resistencia a compresión simple en MPa.	50
Gráfica 3. Resistencia a compresión simple en MPa corregida.....	51
Gráfica 4. Evolución de la temperatura de fraguado.	52
Gráfica 5. Detalle de la gráfica de temperatura.	53
Gráfica 6. Evolución del calor vs tiempo	53
Gráfica 7. Resistencia a tracción durante el fraguado en MPa.....	56
Gráfica 8. Resistencia a tracción durante el fraguado en MPa modificada.....	57
Gráfica 9. Representación de los resultados de un ensayo.....	58
Gráfica 10. EA y tensión de la probeta 6.2.	59
Gráfica 11. Probeta 8.2.....	59
Gráfica 12. Probeta 8.2. modificada.....	60
Gráfica 13. Probeta 1.1.....	61
Gráfica 14. Probeta 5.3.....	61
Gráfica 15. Comparación resistencia a tracción patrón.	62
Gráfica 16. Comparación resistencia a tracción patrón modificado.	63
Gráfica 17. Probetas vibradas durante 1 minuto.	65
Gráfica 18. Probetas vibradas 1 minuto modificadas.	66
Gráfica 19. Probetas vibradas 5 minutos.	67
Gráfica 20. Probetas vibradas 5 minutos modificada.	68
Gráfica 21. Probetas vibradas 10 minutos.	69
Gráfica 22. Probetas vibradas 10 minutos modificada.	70
Gráfica 23. Porcentaje de la tensión de comienzo de daños respecto a la tensión de rotura.	72
Gráfica 24. Porcentaje de la tensión de comienzo de daños respecto a la tensión de rotura.	73



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



Gráfica 25. Porcentaje de la tensión de comienzo de daños respecto a la tensión de rotura..... 74

Gráfica 26. porcentaje de la tensión de inicio de daños respecto a la tensión de rotura.
..... 75

Gráfica 27. Comportamiento en porcentaje de la tensión de rotura en las probetas. ..76

Gráfica 28. Comportamiento en porcentaje de la tensión a la que comienzan a sufrir las probetas..... 77



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características técnicas de la célula de carga de 5 kN.	29
Tabla 2. Características técnicas del sensor de desplazamiento.	30
Tabla 3. Características técnicas de la tarjeta DEWE	31
Tabla 4. Características técnicas de la célula de carga.....	35
Tabla 5. Características de los acelerómetros	40
Tabla 6. Características técnicas del sensor de emisión acústica.	41
Tabla 7. Características técnicas de la comet.	46
Tabla 8. Primer dígito (X) del nombre de las probetas.	48
Tabla 9. Segundo dígito (y) del nombre de las probetas.	49
Tabla 10. Resistencias a compresión simple de las probetas en MPa.	49
Tabla 11. Resistencia a tracción indirecta de los patrones en MPa.....	55
Tabla 12. Porcentajes de tensión en el inicio de daños respecto a la tensión de rotura.	71



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este Trabajo Fin de Máster se pretende analizar la evolución de un parámetro tan importante como es la resistencia del hormigón proyectado no solo ante el paso del tiempo, sino también en el caso en el que éste sea sometido a vibraciones. Se pretende, por tanto, obtener una caracterización del hormigón bajo la influencia de las vibraciones y bajo el efecto que en él tendrá someterlo a periodos de vibrado diferentes dentro de su periodo de fraguado. Para realizar un análisis más completo se utilizará un equipo para detectar la emisión acústica cuando el material se somete a un esfuerzo, lo que facilitará la detección de microgrietas dentro del hormigón antes de su rotura.

El hormigón proyectado se puede definir como una mezcla de cemento, áridos, diferentes aditivos y agua. Normalmente se utiliza en construcción de túneles, pozos, trabajos de restauración y sostenimiento de taludes. Sus múltiples aplicaciones se deben a la rapidez que posee para garantizar la estabilidad de la superficie y la rapidez de endurecimiento.

Han sido muy numerosos los estudios que se han realizado acerca de este material, con el fin de determinar sus propiedades mecánicas. También se han llevado a cabo diferentes pruebas en las que se variaba la dosificación del hormigón proyectado, se añadían aditivos, o se sustituían los componentes principales por diversos y nuevos materiales, como la fibra, las cenizas volantes, etc. siempre con el fin de obtener una mejor trabajabilidad, una mayor resistencia y una mejor adherencia al macizo rocoso sobre el que se proyecta.

La resistencia, por tanto, es una de las propiedades más importantes que el hormigón proyectado debe conservar, ya que al ser utilizado como sostenimiento de túneles o taludes se encuentra sometido a numerosos esfuerzos que debe soportar durante un periodo largo de tiempo.

Por esta razón el presente TFM se va a centrar en obtener la resistencia de un hormigón en diferentes momentos dentro de su periodo de fraguado. Para ello se ha realizado una campaña de ensayos sobre una amasada de hormigón cuyas propiedades se ha buscado sean lo más parecidas posibles al hormigón proyectado. La campaña consiste en realizar ensayos de compresión simple y tracción indirecta durante el periodo de fraguado, y, además, comprobar cómo condiciona a esta evolución de la resistencia el hecho de que durante el fraguado el material se vea sometido a vibraciones de



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



diferentes duraciones. La campaña de ensayos irá acompañada de un control mediante un equipo de emisión acústica para poder determinar si esta herramienta posibilita la detección de daños ocasionados por fenómenos dinámicos, como pueden ser las vibraciones de una voladura.



2. ANTECEDENTES

Antes de llevar a cabo el diseño y ejecución de la campaña de experimentos se ha llevado a cabo una revisión del estado del arte en cuanto al efecto de las cargas dinámicas sobre la gunita y la aplicabilidad de la emisión acústica para detectar el inicio del daño en el interior de materiales sometidos a esfuerzos.

2.1 La gunita sometida a vibraciones

La palabra gunita no está registrada bajo patentes. En el mundo se conoce con el nombre de:

- Shotcrete en Estados Unidos.
- Beton Projecté en Francia y Bélgica.
- Spritzbeton en Alemania.
- Mortero y Hormigón proyectado en España.

El hormigón proyectado se puede definir como un mortero cuyo tamaño máximo de árido puede llegar hasta 8 milímetros, y que aplicado a máquina se proyecta a gran velocidad sobre una superficie a través de una manguera y una boquilla. (SIKA S.A.U., (2009) *Sistemas de Aplicación de productos Sika en el hormigón proyectado.*)

El hormigón proyectado es diferente al hormigón compacto no solo por su composición, sino también por su forma de aplicación. Existen tres métodos utilizados para la aplicación del hormigón, en todos ellos se conduce la mezcla mediante aire comprimido a través de una manguera. La mezcla se transporta hasta la boquilla desde la que se proyecta sobre la estructura o pared. Se explican a continuación los métodos existentes de manera breve:

- **Sistema de proyección por vía seca**

El sistema de proyección por vía seca consta de una serie de fases y requiere la utilización de una serie de equipos especializados. Las diferentes fases que conforman este sistema son las siguientes (véase en el esquema de la Figura 1):

- 1º. El cemento y los áridos se mezclan hasta conseguir una mezcla homogénea. La mezcla de cemento/áridos se introduce en una máquina de proyección a través de la tolva de alimentación.
- 2º. La mezcla entra en la manguera que la transporta mediante una rueda o distribuidor (rotor). Es en este punto cuando se puede añadir el acelerante en polvo.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



- 3º. La mezcla es transportada mediante aire comprimido hasta una boquilla. La boquilla va equipada con un distribuidor múltiple perforado a través del cual se pulveriza el agua a presión y/o el acelerante de fraguado líquido que se mezcla con el conjunto cemento/áridos.
- 4º. La mezcla ya húmeda se proyecta desde la boquilla sobre la superficie que debe gunitarse.

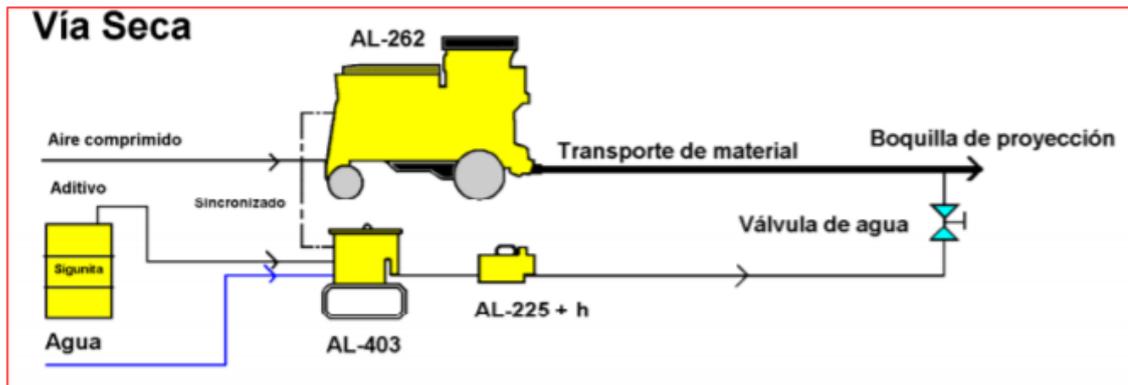


FIGURA 1. SISTEMA DE PROYECCIÓN POR VÍA SECA. FUENTE: S.I.K.A. (2009) SISTEMAS DE APLICACIÓN DE PRODUCTOS SIKA EN EL HORMIGÓN PROYECTADO.

– Sistema de proyección por vía húmeda

En el mercado existen dos tipos de máquinas para la proyección por vía húmeda del hormigón: flujo diluido y flujo denso. El transporte por flujo diluido consiste en el transporte mediante aire comprimido mientras que el transporte por flujo denso consiste en bombear la mezcla. El que más se utiliza es el de transporte por vía húmeda y flujo denso.

A continuación, se resume el procedimiento de proyección por vía húmeda (véase en el esquema de la Figura 2):

- 1º. Se mezclan el cemento, los áridos, el agua y los aditivos adecuadamente hasta conseguir una mezcla homogénea.
- 2º. La mezcla húmeda de cemento/áridos/agua se introduce en la tolva de alimentación de la máquina de proyección.
- 3º. La mezcla entra en la manguera de transporte mediante una rueda o distribuidor (Flujo diluido) o en los pistones de la bomba (Flujo denso).
- 4º. La mezcla se transporta mediante aire comprimido (flujo diluido) o por bombeo (flujo denso) hasta la boquilla de proyección. Los aditivos se adicionan en la boquilla. Además, la boquilla va equipada con un distribuidor de aire para ayudar a la proyección.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



5°. La mezcla se proyecta desde la boquilla sobre la superficie que debe gunitarse.

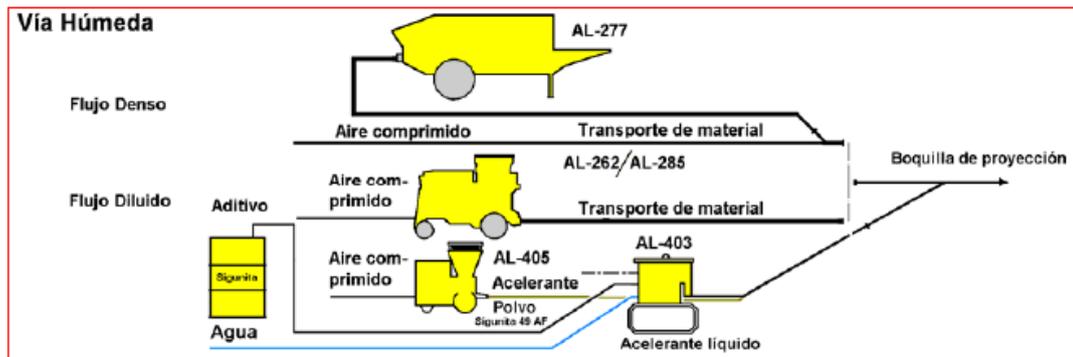


FIGURA 2. SISTEMA DE PROYECCIÓN POR VÍA HÚMEDA. FUENTE: S.I.K.A. (2009) SISTEMAS DE APLICACIÓN DE PRODUCTOS SIKA EN EL HORMIGÓN PROYECTADO.

– Sistema de proyección por vía semihúmeda

Este sistema (véase el esquema en la Figura 3) es en sus primeras fases idéntico al sistema de proyección por vía seca, únicamente se diferencia en que la adición del agua se realiza a una distancia de 4-5 metros de la boquilla de proyección. De esta manera se mejoran las propiedades de la mezcla. Otra de las ventajas de este método es que evita el polvo resultante de la proyección por vía húmeda. También se puede considerar que el agua añadida se incorpora perfectamente durante los 4-5 metros a la mezcla, haciéndola más homogénea, y lo que es más importante manteniendo una relación cemento/agua adecuada. (S.I.K.A. (2009) *Sistemas de Aplicación de productos Sika en el hormigón proyectado.*)

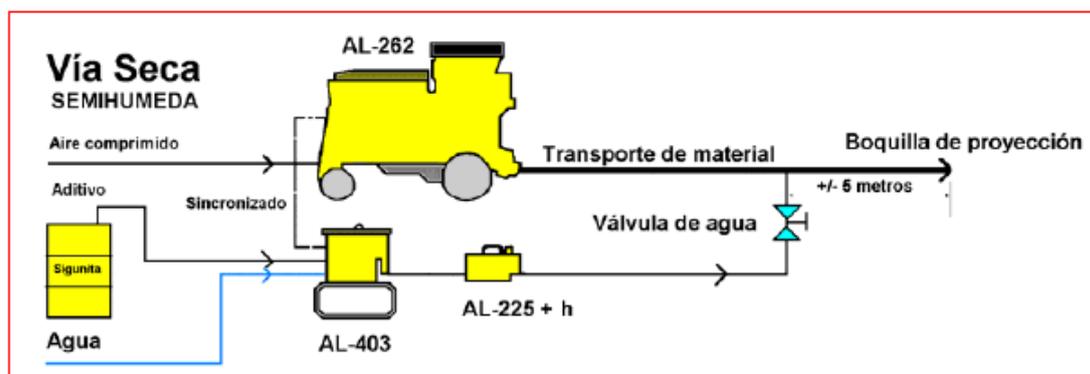


FIGURA 3. SISTEMA DE PROYECCIÓN POR VÍA SEMIHÚMEDA. FUENTE: S.I.K.A. (2009) SISTEMAS DE APLICACIÓN DE PRODUCTOS SIKA EN EL HORMIGÓN PROYECTADO.

Además de la forma de aplicación, el hormigón proyectado difiere del hormigón compacto en numerosas propiedades, algunas de estas son la impermeabilidad, la



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



resistencia a congelarse y durabilidad, resistencia, etc. La resistencia en el hormigón proyectado se ve influenciada por la adición de acelerantes en su dosificación. La adición de acelerantes a su composición hace que el proceso de hidratación y el producto final sea diferente.

Es por esto, que el hormigón proyectado se utiliza comúnmente como sostenimiento de túneles, por que, gracias a la adición de acelerantes a su composición, alcanza la resistencia óptima en un periodo de tiempo mucho menor.

Han sido muy numerosos los ensayos que se han llevado a cabo en hormigón proyectado con diferentes periodos de maduración en túneles para estudiar su comportamiento y determinar los posibles daños que pueden aparecer, especialmente tras haber sido sometido a vibraciones producidas por voladuras.

No hay una definición consistente del hormigón joven o poco curado, pero el “hormigón fresco” se define según la Guía Austriaca del Hormigón (1997) como aquel que no tiene una edad de curado superior a las 24 horas.

A este respecto, Ansell (2004), llevó a cabo pruebas in situ en la mina de hierro Kiirunavaara en hormigón joven de edad de 1 a 25 horas proyectado sobre las paredes de un túnel, afirma que el hormigón joven sigue siendo funcional incluso después de haber sido sometido a vibraciones producidas por voladura. Se comprobó que las vibraciones pueden llegar a fracturar la roca, pero no el hormigón proyectado que las sostiene. También se estudiaron las velocidades de vibración a las que comenzaban a darse los primeros daños de pérdida de adherencia entre la roca y el hormigón proyectado, los daños aparecían a velocidades de entre 0,5-1,0 m/s y en zonas en las que la roca estaba muy fracturada las velocidades eran en torno a 1 m/s. Sin embargo, no se vieron diferencias significativas respecto a estos puntos para hormigones de diferentes edades.

Respecto al hormigón con un mayor tiempo de curado, se han realizado también cuantiosos ensayos para determinar el comportamiento de este ante las vibraciones. Kendorski (1973) realizó test in situ para determinar cómo afecta al hormigón proyectado una voladura y, determinó que las grietas comenzaban a aparecer a una distancia de 16,5 metros de la detonación. Nakano (1993) llevo a cabo pruebas similares durante la construcción de dos túneles paralelos determinó que las primeras grietas aparecían con velocidades de partícula superiores a 700 mm/s. Mc Creath (1994), Tannant y McDowell



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



(1993) y Wood y Tannant (1994), llevaron a cabo ensayos en una mina de oro canadiense sobre hormigón curado reforzado con fibras de vidrio y fibras de acero, que mantuvieron sus propiedades hasta niveles de vibración de 1500-2000 mm/s.

Se ha tomado como referencia también el Trabajo Fin de Grado “Efecto de las vibraciones sobre el comportamiento de la gunita en túneles” de Cristina Lorenzana en 2016. En este trabajo Cristina, estudió la junta que se crea entre las diferentes capas de gunita que se proyectan en un túnel. Hizo un estudio en gunita joven y una de las conclusiones más interesantes a las que llegó fue el claro daño que la junta sufría cuando ésta era sometida a vibraciones. Además, utilizando el equipo de ultrasonidos observó que la velocidad de transmisión era mayor después del vibrado cuando el hormigón tenía una edad temprana, es decir, las vibraciones generaban mejoras en el hormigón muy temprano. También determinó mediante ensayos de la junta con un cincel que ésta perdía adherencia al ser sometida a vibraciones hasta un 40%.

Con toda la información recogida acerca del comportamiento de la gunita sometida a vibraciones, y repasando la cantidad de investigaciones que se han llevado a cabo sobre este material, se decidió enfocar el presente Trabajo Fin de Máster hacia el estudio de la resistencia como parámetro característico de la gunita y como se va a ver afectado por las vibraciones. Si bien, existen numerosos factores que deben tenerse en cuenta en la utilización de gunita como sostenimiento en un túnel o talud, por tanto, es un tema realmente amplio el cual posee infinitas líneas de investigación de las cuales, se ha seleccionado una.

2.2 La emisión acústica

En la última década se ha implantado una valiosa herramienta para el análisis y diagnóstico de estructuras, se trata de la emisión acústica. Actualmente, existen equipos que permiten “escuchar” lo que sucede en el interior de una estructura, permitiendo evaluar los daños que en ella están ocurriendo.

La emisión acústica (EA) se puede definir como el fenómeno que produce ondas elásticas como consecuencia de una rápida liberación de energía desde una o varias fuentes localizadas dentro del material, o el tránsito de las ondas elásticas generadas por el material (Noorsuhada, 2016)



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



Su utilidad es clara puesto que la detección de daños estructurales a tiempo puede aumentar notablemente la vida de una estructura o de un componente (Noorsuhada et al., 2013)

Fue Evans en 1960 quien utilizó por primera vez la técnica de la emisión acústica de manera comercial, para realizar ensayos en sistemas presurizados para las industrias químicas y aeroespaciales. Sin embargo, como recogen Ohtsu y Watanabe (2010) la Emisión Acústica se comenzó a utilizar ya en 1950 por Josep Kaiser.

Kishinoue (1990) trabajó depurando la técnica, investigando sobre los ruidos del ambiente y su influencia sobre los registros.

Más adelante fue Ohtsu (1991) quien publicó un análisis avanzado sobre el procedimiento para determinar la localización de las grietas, el tipo de grieta y la orientación de éstas en estructuras de cemento. El procedimiento propuesto fue aplicado a un puñado de testigos extraídos de un bloque de hormigón. De estos ensayos se dedujo que el método era óptimo para determinar microrroturas cinemáticas generadas en el hormigón.

J.R. Watson en 2001 continuó con la investigación acerca de la ubicación de las grietas, determinando que esta capacidad de la EA era una de sus características más importantes.

De esta manera, sabiendo en que punto de la estructura podían ubicarse las grietas K.M. Holford en 2009 presentó la EA como técnica importante para la monitorización de estructuras que puedan tener grietas en su interior.

El análisis de la señal de EA ha sido de gran utilidad para evaluar también la integridad de una estructura de hormigón reforzado. Esto se debe a que la EA está diseñada para “escuchar” sonidos en el material que se deban a microrroturas y deformaciones plásticas. Aún más, es sensible en la detección de procesos microscópicos activos y la propagación de grietas (T.J. Fowler, P.C. Berkowitz, 1995). También se utiliza para determinar las ondas de presión generadas por las discontinuidades estructurales que progresan hacia la superficie de la estructura (N. Ativitavas, 2002).

Xu (2008), realizó la evaluación de vigas de hormigón pretensado utilizando EA. Propuso un nuevo método de evaluación basado en la intensidad de la señal en cada



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



momento. Este nuevo método demostró ser efectivo para identificar la integridad de la viga. Se mostró una buena correlación entre los ciclos de carga y la EA.

La emisión acústica da la posibilidad de obtener a tiempo real las variaciones que se producen dentro de un material, además de poder monitorizar el grado y la velocidad de progreso del daño. (M. Aldahdooh et al., 2013)

Takeshi Watanabe et al. en 2010, realizaron pruebas en hormigón proyectado al que añadieron cenizas volantes en su dosificación con el objetivo de sustituir parte de la arena de su dosificación común, el fin que se buscó fue el de aumentar la resistencia a compresión de las muestras. Para demostrar el efecto de las cenizas volantes, compararon los resultados entre el hormigón sin cenizas volantes (shotcrete without fly ash, SCP) y el hormigón con cenizas volantes (Shotcrete using fly ash, SCFA). Para la obtención de las muestras, el hormigón fue proyectado en las paredes de un túnel donde se dejaron curar durante 9 días, después fueron llevadas a laboratorio para realizar los ensayos.

La evaluación de la resistencia del hormigón proyectado se realizó utilizando el apoyo de emisión acústica durante un ensayo de compresión uniaxial. Se obtuvieron las propiedades de rotura de las probetas y pudieron elucidar el efecto de las burbujas de aire en el material.

De los ensayos realizados se concluyó que, en la mayoría de los casos, una repentina actividad de emisión acústica ocurrió justo antes de la rotura del hormigón. Esto es debido a que la EA está físicamente correlacionada con la nucleación de las micro y meso-grietas en el hormigón. El análisis de daños relativos, llevado a cabo mediante emisión acústica confirma, pues, que los poros en el hormigón proyectado son la causa de la aparición de grietas cuando están sometidas a bajos niveles de carga.



3. METODOLOGÍA PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Dado que el objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es el de caracterizar el hormigón proyectado en diferentes instantes de su fraguado, habiendo sido sometido este a vibraciones que pudiesen ser provocadas por voladuras, se ha llevado a cabo una campaña de ensayos sobre una tipología de mortero, sin variar su dosificación en ningún momento. Además, para poder obtener una mezcla que se asemeje a un hormigón proyectado en una situación real en un túnel, se ha añadido acelerante a la mezcla de cemento, áridos y agua.

La temperatura y humedad ambiental tienen una gran influencia en el fraguado del hormigón. Si la temperatura ambiental es muy alta el hormigón tendrá una mayor demanda de agua. Esto puede derivar en una aceleración del fraguado y en una menor resistencia del material. La humedad es también un factor importante a la hora del fraguado, condiciona la necesidad del agua del hormigón. Debido a la gran influencia de estos dos parámetros en las características finales del hormigón, se decidió realizar todas las probetas de una sola tanda, para intentar conseguir las mismas condiciones ambientales en todas las probetas.

La mezcla de mortero elegida es una mezcla 1:1, teniendo la misma proporción de áridos que de cemento. El árido utilizado para para mezcla es arena común, con una granulometría máxima de 2 milímetros.



FIGURA 4. ARENA UTILIZADA.

La arena empleada para la realización del mortero se utilizó tal y como venía de fábrica, sin realizar en ella modificaciones, es por esto, que se debe tener en cuenta la humedad



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



que en ella había. El cálculo de la humedad de la arena se realizó según la norma UNE 103-300-93.

Esta norma establece que se debe calcular la humedad de una pequeña muestra mediante la siguiente fórmula:

$$w = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_3 - m_1)} \times 100$$

Dónde:

m_1 : Masa del recipiente y la tapa.

m_2 : masa del recipiente, la tapa y la muestra húmeda.

m_3 : masa del recipiente la tapa y la muestra seca.

Se realizó el cálculo de los pesos.

El recipiente con la tapa que se puede ver en la Figura 5 sumaban un total de 57,7 gramos.



FIGURA 5. RECIPIENTE Y TAPA.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



Se introdujo una pequeña cantidad de muestra en el recipiente, estando la muestra húmeda, y sumaba 128,41 gramos se muestra en la Figura 6.



FIGURA 6. RECIPIENTE, TAPA Y MUESTRA HÚMEDA.

Y, por último, se secó la muestra. Para ello se introdujo en la estufa a 105 °C, sin la tapa durante 24 horas.

Pasado este tiempo, se dejó enfriar a temperatura ambiente con la tapa puesta, para no verse afectada por la humedad del ambiente, y se pesó una vez enfriada resultando 125,5 gramos. Puede verse el resultado en la Figura 7.



FIGURA 7. RECIPIENTE, TAPA Y MUESTRA SECA.

Sustituyendo los valores de los pesos en la fórmula anterior, se obtendrá la humedad.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



$$w = \frac{(128,41 - 125,5)}{(125,5 - 57,7)} \times 100 = 4,3 \%$$

La humedad total de la arena es de un 4,3%. Este valor de humedad es importante porque a la hora de introducir el agua de amasado a la dosificación total tuvo que corregirse la cantidad utilizando este valor, ya que la arena ya llevaba parte del agua que era necesaria para la muestra.

El cemento utilizado que puede verse en la Figura 8 es el cemento común gris, cuya denominación es CEM II/B-V 32,5 R.



FIGURA 8. CEMENTO UTILIZADO.

La proporción de agua añadida a la mezcla es de 1:2, es decir, por cada 2 unidades de cemento se añadieron 1 de agua. Sin embargo, como se trata de analizar el comportamiento de la gunita, para que esta mezcla tuviese unas propiedades parecidas al hormigón proyectado, parte de la proporción de agua introducida en la mezcla fue sustituida por acelerante. Según fabricante se hizo con una proporción de 1:5, es decir, por cada 5 de agua 1 era acelerante. Se muestra en la imagen a continuación el acelerante utilizado. Es un acelerante líquido para mortero y hormigón que pertenece a S.I.K.A. llamado Oleoplast, se muestra en la Figura 9.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



FIGURA 9. ACCELERANTE EMPLEADO.

Para la realización de la mezcla de mortero, los pasos que se siguieron fueron:

- 1º. Tamizado de la arena hasta obtener una granulometría menor de 2 milímetros y pesado de la arena tamizada para obtener la cantidad correspondiente. Se muestra en la Figura 10 la arena preparada para realizar la mezcla.



FIGURA 10. ARENA PREPARADA PARA REALIZAR LA MEZCLA DE MORTERO.

- 2º. Pesado del cemento para obtener la misma cantidad que de arena. Se muestra en la Figura 11.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



FIGURA 11. CEMENTO PREPARADO PARA REALIZAR LA MEZCLA DE MORTERO.

- 3º. Preparación del agua y del acelerante y mezclado de ambos componentes.
- 4º. Mezcla del cemento para homogeneizarlo durante 30 segundos, la mezcla se realizó mediante un taladro al que se le puso una herramienta mezcladora en su extremo.
- 5º. Se añade la arena, y se mezclan cemento y arena durante 30 segundos.
- 6º. Se añade el agua y el acelerante en pequeñas dosis y se mezcla con la mezcladora hasta obtener una muestra homogénea, aproximadamente durante 3 minutos. Se muestra en la Figura 12 el proceso de mezclado de todos los componentes.



FIGURA 12. MEZCLA DE TODOS LOS COMPONENTES.



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



Una vez obtenida la mezcla homogénea, se introduce ésta en moldes de PVC previamente preparados. Estos tienen las dimensiones y proporciones exigidas para la realización de los ensayos una vez comience el periodo de fraguado según la normal UNE22/950-90. Se muestra en la Figura 13 algunas de las probetas. En total se prepararon 40 probetas, 32 probetas de tracción y 8 de compresión.



FIGURA 13. ALGUNAS DE LAS PROBETAS LISTAS PARA FRAGUAR.



4. DISEÑO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Para la caracterización del hormigón se llevaron a cabo dos tipos de ensayos en laboratorio, por un lado, ensayos de resistencia a tracción indirecta y, por otro lado, ensayos de resistencia a compresión simple.

Para simular el efecto de las vibraciones en las probetas, y poder ver el efecto de la fatiga sobre el hormigón en diferentes instantes de su fraguado, las probetas que iban a ser ensayadas a tracción indirecta fueron vibradas mediante una mesa generadora de vibraciones a una intensidad de vibración de 0,6g's durante tres periodos de tiempo diferentes: 1 minuto, 5 minutos y 10 minutos.

Como se ha comentado los ensayos se realizaron en diferentes momentos del periodo de fraguado del hormigón. Para determinar cuáles eran los momentos óptimos para la realización de los ensayos se llevó a cabo previamente una precampaña de ensayos.

En esta precampaña se amasó una pequeña cantidad de mortero con las proporciones que iba a tener la mezcla final. Se prepararon 8 probetas de tracción y 5 probetas de compresión. Estas probetas, fueron ensayadas en diferentes puntos de su fraguado, y fueron sometidas a diferentes intensidades de vibración. Tras ensayar las probetas y analizar los resultados obtenidos, se tomó la decisión de realizar un mayor número de ensayos al inicio del fraguado de las probetas, para conocer mejor el comportamiento del hormigón en los primeros momentos de su fraguado, y, además, se llegó a la conclusión de que en general, causaba más daños exponer una probeta a amplios periodos de tiempo que a intensidades altas.

Por tanto, se seleccionaron los siguientes tiempos de fraguado: 15 horas, 24 horas, 48 horas, 72 horas, 8 días, 10 días, 14 días y 28 días, siendo este último el momento en el que el hormigón alcanza su resistencia característica. Dado que el hormigón lleva acelerante en su dosificación el periodo de fraguado se consigue reducir a la mitad. Se espera conseguir una resistencia muy parecida a la característica (la de 28 días) pasados 14 días de fraguado.

Para determinar la variación de la resistencia a compresión de la mezcla con el paso de los días, según fuese avanzando su fraguado, se hicieron ensayos de compresión simple durante los mismos días que se ensayaron las probetas de tracción, es decir, al cabo de 24 horas, 48 horas, 72 horas, 8 días, 10 días, 14 días y 28 días.



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



Además, en una de las probetas de compresión se introdujo un sensor temperatura, para poder comprobar el cambio de la temperatura en el interior de la probeta a lo largo de su fraguado y comprobar la evolución del proceso químico.

Durante la ejecución de los ensayos a tracción indirecta se realizó un control de emisión acústica, para poder comprobar, los fenómenos (eventos) que se daban en el interior de las probetas durante su carga. El objetivo de esta auscultación es el de determinar la intensidad de los eventos que preceden a la rotura, la carga a la que se inician y la influencia de las vibraciones a las que se ve sometido el hormigón, sobre su generación, para así poder utilizar esta metodología como herramienta de prevención ante la rotura del hormigón en una situación real.

El esquema de los ensayos realizados se muestra en la Figura 14.

La nomenclatura utilizada para las probetas es la siguiente. En orden ascendente desde 1 hasta 8, se han nombrado los días en los que se realizaron ensayos, correspondiendo 1 a los ensayos realizados tras 15 horas del inicio del fraguado hasta el 8, que son los ensayos realizados en el día 28.

La segunda cifra, corresponde al tiempo que se han estado vibrando las probetas, 1 para las vibradas 1 minuto, 2 para las vibradas 5 minutos y 3 para las vibradas 10 minutos.

La probeta 2.3. será entonces la vibrada pasadas 24 horas desde el inicio del fraguado y vibrada durante 10 minutos a 0,6g's.

Además, cada día, se muestreó un patrón, que recibirán el nombre de PATRÓN P"X", siendo "X" el día en el que se realizó el ensayo, de 1 hasta 8. Y se ensayó una probeta de compresión que recibirán el nombre P"X"Comp, siendo de nuevo la "X" el día en el que se realizó el ensayo desde 1 hasta 8.



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**

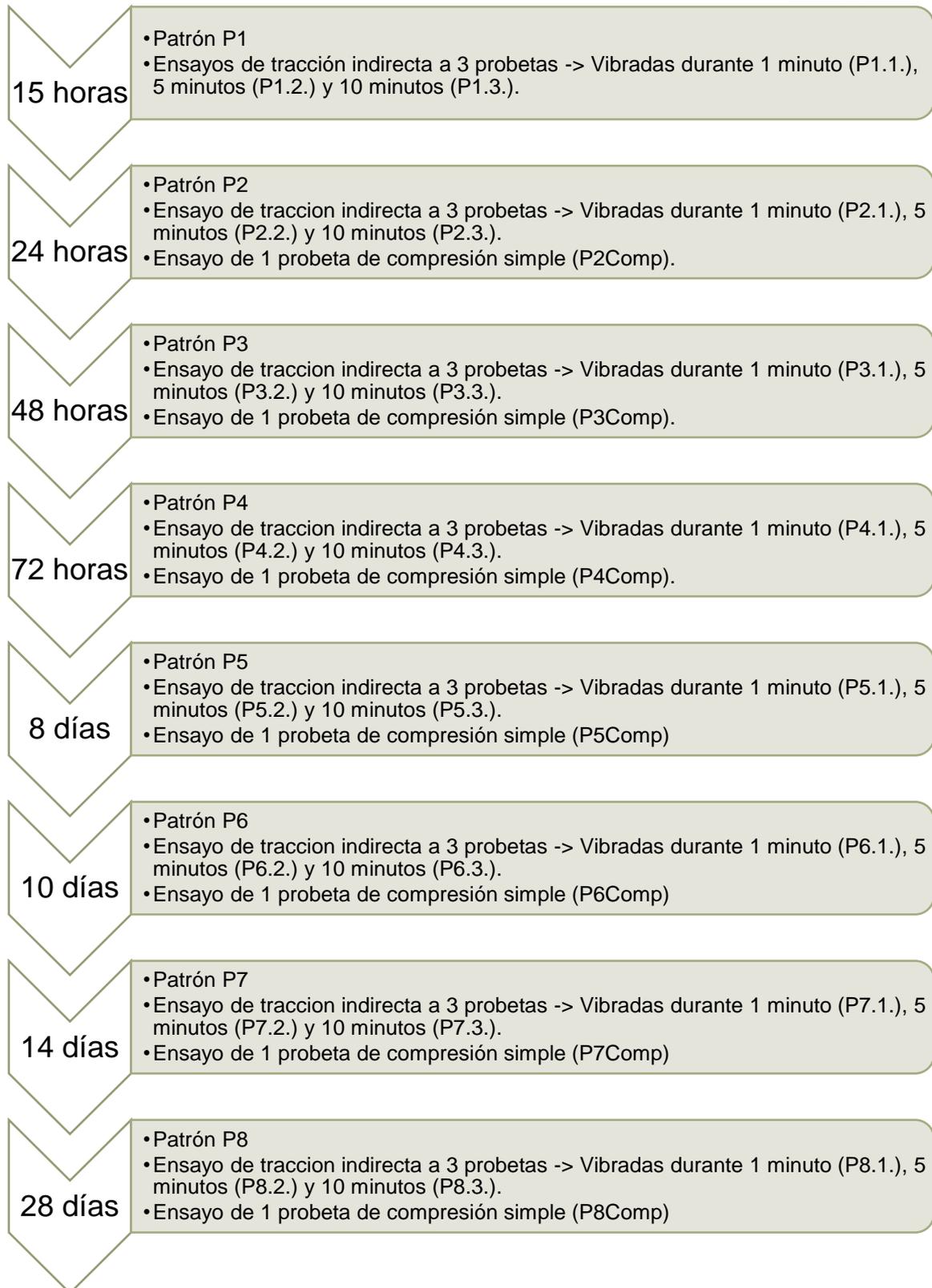


FIGURA 14. ESQUEMA GENERAL DE LOS ENSAYOS REALIZADOS.



5. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

A continuación, se van a describir los equipos utilizados durante los ensayos en el laboratorio.

5.1. Prensa de carga universal manual

5.1.1. Descripción del equipo

La prensa manual es un equipo utilizado en laboratorio para realizar ensayos de tracción indirecta, compresión, etc. Se puede ver en la Figura 15.

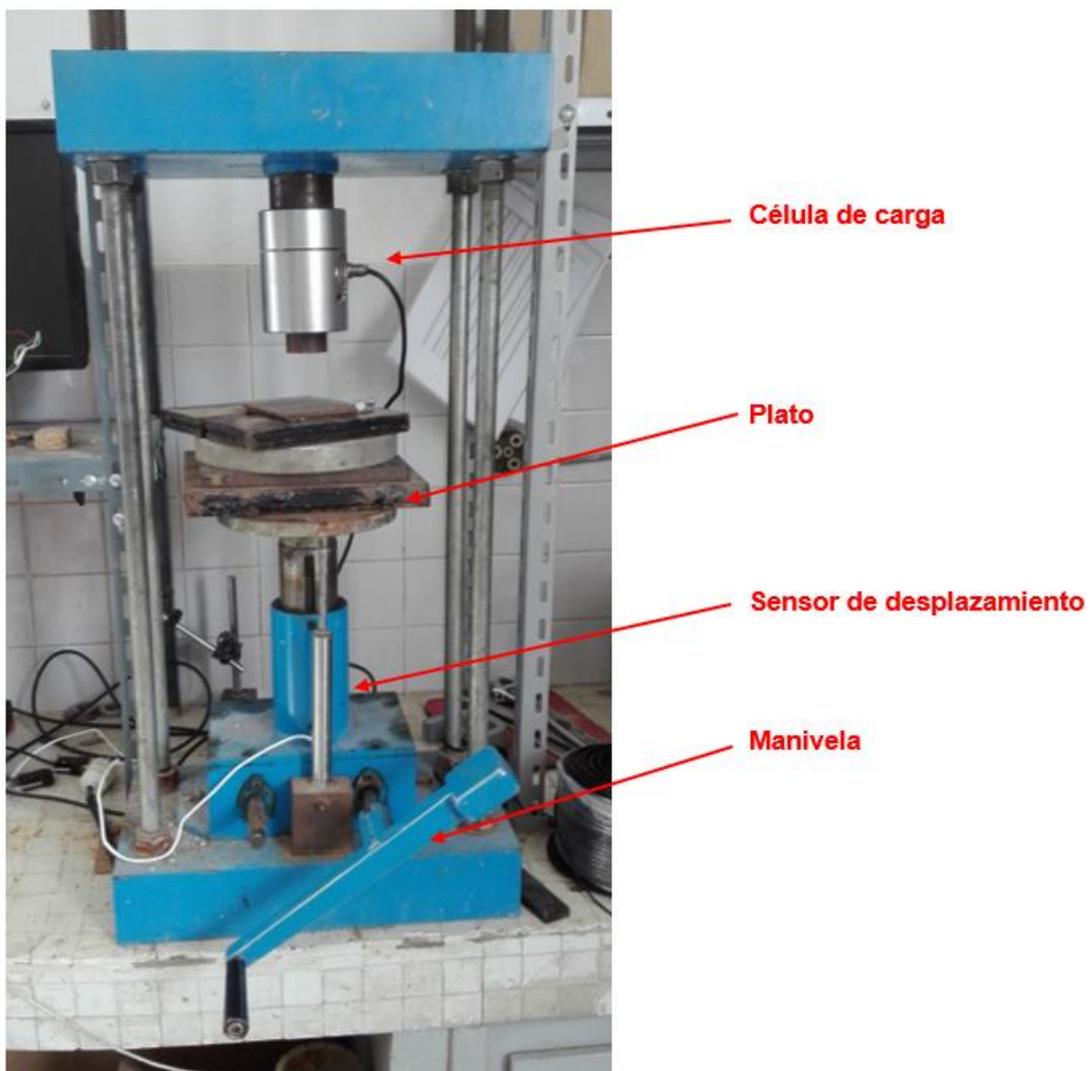


FIGURA 15. PRENSA MANUAL



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



Este equipo se divide en diferentes partes. La parte principal de la prensa manual es el cilindro hidráulico que tras accionarlo manualmente aplica la carga sobre las probetas hasta romperlas. La prensa manual lleva instalada una célula de carga que es la encargada de convertir en señal eléctrica medible la fuerza que se aplica. La célula de carga que se utilizó fue de 5 kN.

Además, se dispuso un sensor de desplazamiento en la parte inferior para medir el desplazamiento del plato en los ensayos. Este sensor tiene un recorrido de 50 milímetros y una precisión de décimas.

Se debe apuntar que como las probetas de tracción tienen un diámetro muy pequeño, se tuvieron que disponer diferentes placas encima del plato para conseguir la altura óptima para la realización del ensayo. Se muestra en la Figura 16 la disposición de todo el equipo para la realización de los ensayos de tracción indirecta.

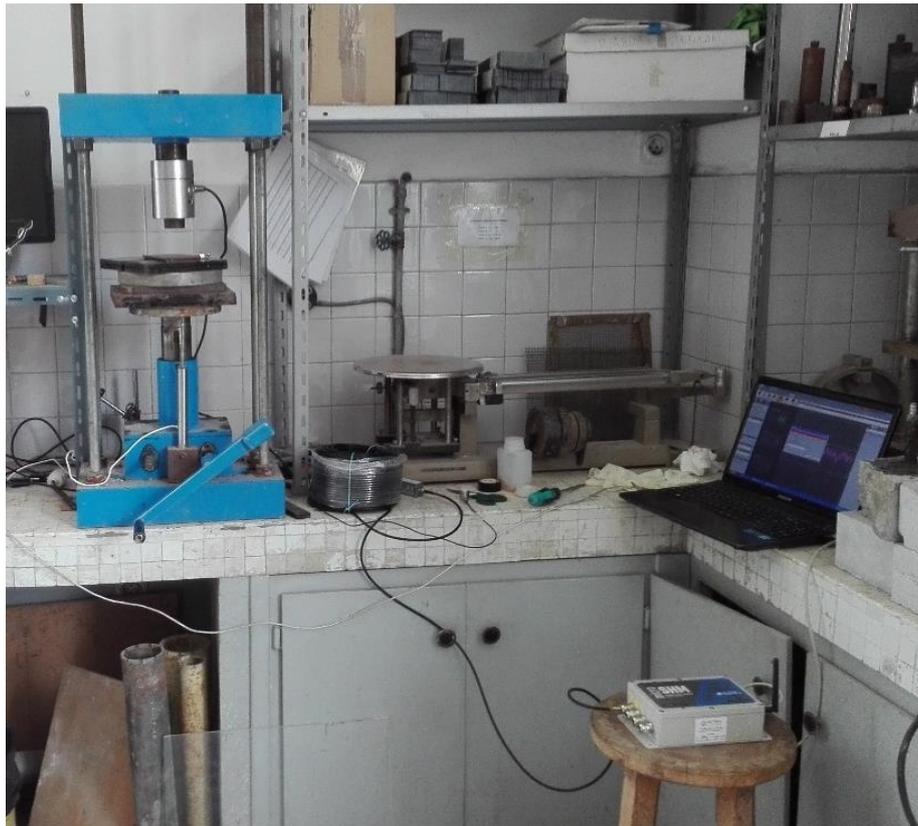


FIGURA 16. DISPOSICIÓN DE LOS EQUIPOS PARA REALIZAR EN ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA.



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



Tanto la célula de carga como el sensor de desplazamiento iban conectados a una tarjeta de adquisición de datos DEWE la cual se conectaba a un ordenador portátil para poder almacenar los datos del ensayo mediante el software DEWESoftX2.

Se muestran a continuación en la Tabla 1 las características técnicas de la célula de carga.

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA CÉLULA DE CARGA DE 5 KN.

ACCURATEZZA	ACCURACY	0.03%
CARICO NOMINALE	NOMINAL LOAD	350 - 500 kg 1 - 2.5 - 5 ⁽¹⁾ - 7.5 - 10 - 20 t
SENSIBILITA' NOMINALE TOLLERANZA DI CALIBRAZIONE	NOMINAL SENSITIVITY CALIBRATION TOLERANCE	4-20 mA (3 wires), ±5V or ±10V ≤±0.1%
NON LINEARITA' NON RIPETIBILITA'	NON LINEARITY NON REPEATABILITY	≤ ±0.03% ≤ ±0.03%
EFFETTO DELLA TEMPERATURA (10 °C) a) sullo zero b) sulla sensibilità	TEMPERATURE EFFECT (10 °C) a) on zero b) on sensitivity	≤ ±0.030% ≤ ±0.011%
ALIMENTAZIONE NOMINALE	NOMINAL POWER SUPPLY	4-20mA and ±5V → 12-24Vdc ±10V → 18-24Vdc
ALIMENTAZIONE MAX. ASSORBIMENTO MAX. (senza carico applicato): RESISTENZA DI CARICO: a) tensione b) corrente RESISTENZA DI ISOLAMENTO BILANCIAMENTO DI ZERO	MAX. POWER SUPPLY MAX. ABSORPTION (without load applied) LOADING RESISTANCE: a) tension b) current INSULATION RESISTANCE ZERO BALANCE	28Vdc 30mA min. 3KΩ from 0 to 470Ω >2 GΩ ± 1%
VALORI MECCANICI LIMITE riferiti al carico nominale: a) carico minimo b) carico di servizio c) carico limite d) carico di rottura e) massimo carico trasversale f) carico dinamico limite FRECCIA MAX. AL CARICO NOMINALE	MECHANICAL LIMIT values referred to nominal load: a) minimum load b) service load c) max permissible load d) breaking load e) max transverse load f) max permissible dynamic load DISPLACEMENT AT NOMINAL LOAD	0% 120% 150% >300% 100% 50% ~ 0.3 mm
TEMPERATURA DI RIFERIMENTO CAMPO NOMINALE DI TEMPERATURA TEMPERATURA DI ESERCIZIO TEMPERATURA DI STOCCAGGIO	REFERENCE TEMPERATURE TEMPERATURE NOMINAL RANGE SERVICE TEMPERATURE STORAGE TEMPERATURE	+23°C -10/+40 °C -20/+70 °C -20/+80 °C
PESO CLASSE DI PROTEZIONE (EN 60529) MATERIALE DELLA CELLA LUNGHEZZA CAVO	WEIGHT PROTECTION CLASS (EN 60529) EXECUTION MATERIAL CABLE LENGTH	Ø57:~1.5 kg Ø82:~4.2 kg 20t:~5kg IP67 Acciaio Inox / Stainless Steel 5m
TESTE A SNODO SFERICO CONSIGLIATE	RECOMMENDED KNUCKLE JOINTS	DURBAL EM 20 – EM 30 – EM 42



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



En la Tabla 2 se muestran las características técnicas del sensor de desplazamiento.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SENSOR DE DESPLAZAMIENTO.

CARATTERISTICHE TECNICHE SPECIFICATIONS	SERIE PLS									
	50	100	150	200	250	300	400	500	750	950
• Corse utili mm Strokes mm										
• Elemento resistivo Resistive element	plastica conduttiva conductive plastic									
• Valore resistivo Resistive value	standard: 5 KOhm; a richiesta: 2 KOhm, 10 KOhm, 20 KOhm standard: 5 KOhm; on request: 2 KOhm, 10 KOhm, 20 KOhm									
• Tolleranza valore resistivo Total resistance tolerance	standard $\pm 20\%$, a richiesta $\pm 10\%$ standard $\pm 20\%$; on request $\pm 10\%$									
• Linearità indipendente Independent linearity	$\pm 0.075\%$								$\pm 0.1\%$	
• Risoluzione Resolution	infinita infinite									
• Rumore elettrico Output smoothness	$< 0.1\%$ tensione alimentazione $< 0.1\%$ against input voltage									
• Variazione resistenza di contatto Contact resistance variation	$< 2\%$ C.R.V.									
• Massima potenza (W) power rating (W)	0.5	1	1.75	2	2.25	2.5	3	4	4	4.75
• Coefficiente di resistenza temperatura Resistance temperature coefficient	± 400 p.p.m. /° C									
• Resistenza di isolamento Insulation resistance	> 1000 MOhm a 500 Vcc > 1000 MOhm at 500 Vdc									
• Connessioni elettriche Electrical connections	connettore liberamente orientabile freely rotating connector									
• Materiale custodia Case material	alluminio anodizzato con flange terminali in nylon caricato con vetro anodised aluminium with nylon + glass closing flanges									
• Materiale albero Shaft material	acciaio inossidabile su boccia autolubrificante - rotazione libera stainless steel on autolubricating alebox - free rotation									
• Attrito movimento Sliding friction	0.1 Kg - tipi con molla > 0.5 Kg 0.1 Kg - types with spring > 0.5 Kg									
• Massima tenuta flange terminali Max strain on closing stranges	10 Kg									
• Fissaggio Fixing	supporti metallici posizionabili a piacere freely movable clamping feet									
• Durata Life	20.000.000 manovre senza carico 20,000,000 motions no load									
• Grado di protezione Protection degree	IP65									
• Temperatura di esercizio Operating temperature	$- 25^\circ \div 85^\circ$ C									
• Massima velocità lineare stelo Stem max linear speed	1 m / sec.									
• Resistenza alle vibrazioni (10-2000Hz) Resistance to vibrations (10-2000Hz)	15 G									
• Resistenza all'urto (11 ms) Shock resistance (11 ms)	50 G									

En la Tabla 3 que sigue a continuación se muestra las características de la tarjeta DEWE utilizada para la adquisición de datos.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



TABLA 3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA TARJETA DEWE

Technical Specifications	
Analog inputs	
Number of channels	8
Inputs	Voltage, bridge
ADC type	24 bit sigma delta with anti-aliasing filter
Sampling rate	Simultaneous 200kS/sec
Input type	Differential
Input ranges	$\pm 10V$, $\pm 1V$, $\pm 100mV$, $\pm 10mV$
Sensor supply	12V, 400mA
	$\pm 5V \pm 0.1\%$ bridge sensor supply
Overvoltage protection	$\pm 70V$ input protection
Noise floor	107dB@ $\pm 10V$ range
DC accuracy	
10 V range	0,05% of value +1 mV
1 V range	0,05% of value +0.2 mV
100 mV range	0,05% of value +0.1 mV
10 mV range	0,05% of value +0.1 mV
Input impedance	20M Ω 47pF(differential) 10M Ω 33pF(common mode)
CMRR	>80dB
Maximum common mode voltage	$\pm 13V$
Signal to noise	
0.1kS/s to 51.2kS/s	105dB
51.2ks/s to 102.4kS/s	100dB
102.4kS/s to 200kS/s	75dB
Channel-to-Channel Phase Mismatch	<0.1deg @5kHz
Phase-to-Phase Mismatch	0.6deg @1kHz



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



5.1.2. Descripción del ensayo

El ensayo de tracción indirecta, o también llamado ensayo brasileño permite determinar la resistencia a tracción uniaxial de la roca o en este caso del hormigón indirectamente, asumiendo que la rotura de la roca se produce por tracción cuando el hormigón se somete a un estado de esfuerzos biaxiales, siendo el esfuerzo principal traccional y el otro compresivo no superior a 3 veces el esfuerzo traccional. Para la realización del ensayo se sigue la norma UNE 22/950-90.

Este ensayo consiste en aplicar gradualmente una fuerza axial a una probeta con forma de disco hasta que se produzca la rotura. En el caso de la prensa manual, esta fuerza axial se aplicaba haciendo girar la manivela de la prensa a una velocidad constante.

5.1.2.1. Preparación de las probetas

La mezcla para las probetas a ensayar a tracción ha sido preparada de la forma que se explica en el apartado 3. La altura de las probetas era de 2,5 cm y su diámetro 5 cm, cumpliendo el requisito de esbeltez de 0,5 impuesto por la norma UNE 22/950-90. Una vez sacadas de los moldes en las que fraguaron las bases de las probetas fueron lijadas, para garantizar su paralelismo.

5.1.2.2. Realización del ensayo

El ensayo de tracción indirecta se realiza colocando la probeta de la manera que se muestra en la Figura 17.

Durante todos los ensayos de tracción indirecta, para poder conocer los eventos que ocurren dentro de la probeta antes de su rotura, se coloca el sensor de emisión acústica pegada a una de las caras de la probeta.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.

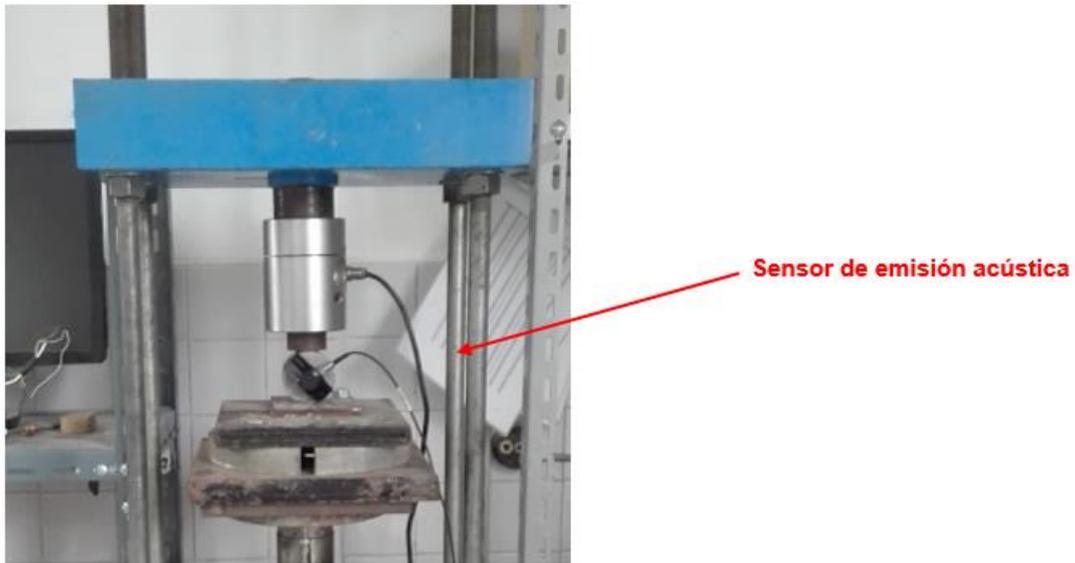


FIGURA 17. PROBETA CON SENSOR DE EMISIÓN ACÚSTICA.

Una vez colocada la probeta, se comienza a aplicar la fuerza haciendo girar la palanca de la prensa manual en la dirección de las agujas del reloj, intentando en todo momento que la velocidad de aplicación de la carga sea constante. El ensayo finaliza cuando la probeta rompe.

La resistencia a tracción se calcula mediante la fórmula:

$$\sigma_t = \frac{2 \times F}{\pi \times l \times d}$$

siendo:

F: Carga de rotura, en N.

d: Diámetro de la probeta, en milímetros.

l: Longitud de la probeta, en milímetros.



5.2. Prensa automática

5.2.1. Descripción del equipo

La prensa automática se utilizó para realizar los ensayos de compresión simple. Sigue un funcionamiento parecido al de la prensa manual, pero los hidráulicos se accionan automáticamente a través de un motor.

Se muestra en la Figura 18 el equipo, es la prensa de CONTROLS modelo C1115.



FIGURA 18. PRENSA AUTOMÁTICA

La prensa tiene una potencia de 1100 W y puede ejercer una fuerza máxima de 2000 kN.

Previamente a la realización de los ensayos es necesario configurar algunos parámetros de la prensa automática. Estas modificaciones deben hacerse desde la pantalla del menú principal que se muestra en la Figura 19.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



FIGURA 19. PANTALLA DE INICIO DE LA PRENSA AUTOMÁTICA.

En este caso, también se ha conectado una tarjeta tipo DEWE al sensor de presión del equipo para poder garantizar la adquisición de los datos en modo continuo durante el ensayo.

Se muestran en la Tabla 4, las características técnicas de esta prensa.

TABLA 4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA CÉLULA DE CARGA.

	ANCHOR LOAD CELLS 
Full scale capacity kN	from 300 to 2500 kN
Overload	1.5 X Full scale
Sensitivity	0.06% FS
Accuracy	< ±0.5% FS
Thermal zero shift	< 0.005% FS / °C
Signal output	1.5 mV/V at FS 2.0 mV/V only for 2500 kN FS
Power supply	from 2V DC to 10V DC
Bridge resistance	700 Ω FS from 300 to 750 kN (8 strain gauges) 1400 Ω FS from 1000 to 2500 kN (16 strain gauges)
Operating temperature range	-30°C +70°C
Compensated temperature range	-30°C +70°C
Material	stainless steel 17-4 PH
Electric insulation	> 5 GΩ
Protection	IP68 up to 100 kPa



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



5.2.2. Descripción del ensayo

El ensayo a compresión simple permite determinar la resistencia uniaxial del hormigón siguiendo la normal UNE 22/950-90. Este ensayo consiste en aplicar gradualmente a una probeta cilíndrica una fuerza axial hasta que se produzca la rotura.

Para la realización del ensayo se utilizó la prensa que se muestra en la Figura 18.

5.2.2.1. Preparación de la muestra

Las muestras cilíndricas para este ensayo se obtuvieron según la metodología descrita en el apartado 3 de este trabajo. Aun así, al igual que con las de tracción, se han tenido que cumplir algunos requisitos impuestos por la norma UNE 22/950-90:

- La relación altura/diámetro, o esbeltez, debe estar comprendida entre 2 y 2,5. En este caso altura de las probetas es de 13 cm y el diámetro 5,2 cm.
- El diámetro de la probeta es, al menos, 10 veces mayor que el grano de mayor tamaño de la muestra (en este caso 2 mm).

Una vez sacadas las muestras de los moldes, se lijaron sus bases para que fueran planas y perpendiculares al eje del cilindro

5.2.2.2. Realización del ensayo

El ensayo de compresión simple consiste en colocar la probeta en la prensa tal y como se muestra en la Figura 20 y aplicarle una fuerza normal a una velocidad que, según la norma UNE 22-950-90/1, deberá estar comprendida entre 0,5 y 1 MPa/seg.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



FIGURA 20. PROBETA DE COMPRESIÓN LISTA PARA ENSAYAR

Estos ajustes se efectúan directamente en el *display* de la prensa introduciendo los siguientes datos, en este caso idénticos para todos los ensayos al mantener todas las probetas las mismas dimensiones:

- Área de la base de la probeta, que es $21,24 \text{ cm}^2$.
- Velocidad de aplicación de la carga en N/s, como la norma marca una velocidad de $0,5 \text{ MPa/s}$ se tiene:

$$0,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times 21,24 \text{ cm}^2 \times \frac{10^2 \text{ mm}^2}{1 \text{ cm}^2} = 1061,85 \text{ N/s}$$



5.3. Mesa generadora de vibraciones

La mesa generadora de vibraciones, o tamizadora, es un equipo que se utiliza para realizar el fraccionamiento granulométrico de un suelo o de un material. La mesa disponible en el laboratorio es de la marca PROETI.

Este equipo fue utilizado para simular las vibraciones en las probetas de tracción, ya que ejerce unas vibraciones de diferentes intensidades que pueden asemejarse a una voladura o a una situación de vibraciones que se prolongue más en el tiempo, siendo este último caso el que interesa en el presente trabajo.

Se muestra en la Figura 21 la disposición de la probeta en la mesa para realizar en vibrado.



FIGURA 21. PROBETA EN LA MESA GENERADORA DE VIBRACIONES

La intensidad a la que se realizaron la vibración de las probetas fue la correspondiente a 0,6 g's. Durante los ensayos se comprobó esta medida mediante un acelerómetro.

5.4. Acelerómetros

Los acelerómetros son sensores que proporcionan una señal eléctrica que varía de forma proporcional a la aceleración medida, dependiendo de la sensibilidad del sensor utilizado.

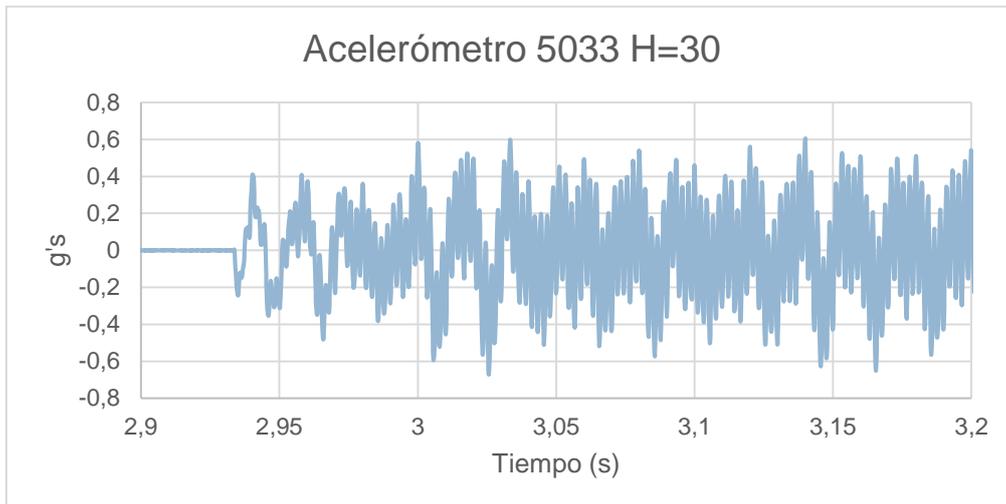
En este caso los acelerómetros fueron utilizados para controlar la intensidad de las vibraciones a las que fueron sometidas las probetas, en la mesa generadora de vibraciones, durante los diferentes periodos de tiempo previstos.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



Para ello se dispuso un acelerómetro sobre ella, captándose los datos de nuevo con una tarjeta DEWE. En la Gráfica 1 se representaron los valores de aceleración medidos en el eje Z del sensor, ya que es en esta dirección en la que la mesa genera mayor intensidad.



GRÁFICA 1. ACELERACIÓN MEDIDA EN EL EJE Z.

La aceleración de pico a la que fueron sometidas las probetas durante los diferentes ensayos fue de 0,6g's.

En la Tabla 5 que aparece a continuación se resumen las características técnicas del acelerómetro utilizado.



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



TABLA 5. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACCELERÓMETROS

Características KS813B		Unidades	
Salida		ICP	
Diseño piezoeléctrico		Cortante	
Sensibilidad de carga	B_{qa}		pC/g
Sensibilidad de voltaje	B_{ua}	100 ±5%	mV/g
Rango	a+/a-	± 55	g
Límite de destrucción	a_{max}	4000	g
Rango de frecuencia lineal	f_{3dB}	0,2 .. 10000	Hz
	$f_{10\%}$	0,4 .. 8000	Hz
	$f_{5\%}$	0,6 .. 7000	Hz
Frecuencia de resonancia (eje z)	f_r	>15 (+25 dB)	kHz
Sensibilidad transversal	$\Gamma_{90 max}$	<5	%
Ruido residual	$a_n wide band$	<140	μg
Densidades de ruido	0,1 Hz a_{n1}	30	$\mu g/\sqrt{Hz}$
	1 Hz a_{n2}	10	$\mu g/\sqrt{Hz}$
	10 Hz a_{n3}	3	$\mu g/\sqrt{Hz}$
	100 Hz a_{n4}	1	$\mu g/\sqrt{Hz}$
Suministro de corriente	I_{CONST}	2 .. 20	mA
Tensión de polarización de salida	U_{bias}	12 .. 13,5	V
Impedancia de salida	r_{OUT}	<250 (4Ma)	Ω
Capacidad sin cable	C_i	.	nF
Características ambientales			
Rango de temperaturas	T_{min}/T_{max}	menos 20 a 90	°C
Características mecánicas			
Peso sin cable	m	115	g
Material		Edelstahl	
Enchufe		Binder 718	

5.5. Emisión acústica

La emisión acústica consiste en la captación de las ondas elásticas generadas por una liberación rápida de energía (defectos, crecimiento de grietas, deformación plástica) cuando un material es sometido a una tensión. El equipo que se utilizó para realizar estos ensayos fue el Micro-SHM y el sensor de auscultación era el R3 α .

5.5.1. Componentes del equipo

- Sensores de emisión acústica.

Debido al reducido tamaño de las probetas, solo se utilizó uno de los sensores que se dispone, son sensores del tipo R3 α . Diseñados especialmente para muestras geológicas y de hormigón. Se muestran a continuación en la Tabla 6 las especificaciones técnicas del sensor.



TABLA 6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SENSOR DE EMISIÓN ACÚSTICA.

OPERATING SPECIFICATIONS

Dynamic

Peak Sensitivity, Ref V/(m/s) 80 dB

Peak Sensitivity, Ref V/ μ bar -63 dB

Operating Frequency Range 25-70 kHz

Resonant Frequency, Ref V/(m/s) 29 kHz

Resonant Frequency, Ref V/ μ bar 140 kHz

Directionality +/-1.5 dB

Y en la Figura 22 se puede ver el sensor de emisión acústica. Para representar la escala del sensor, se debe apuntar que la longitud de los lados de la baldosa sobre la que está apoyada el sensor es de aproximadamente 3 centímetros.



FIGURA 22. SENSOR DE EMISIÓN ACÚSTICA

- Tarjeta de adquisición Micro-SHM.
Esta tarjeta permite la visualización en tiempo real de los eventos que se den dentro de la probeta. Se conecta mediante Wi-Fi al portátil. Dispone de cuatro canales, dos para los sensores de emisión acústica y dos paramétricos para la conexión de galgas y/o señales de 0-5 V (por ejemplo, la célula de carga de 5 kN utilizada durante los ensayos). Para la auscultación de las muestras solo se utilizó uno de los canales dado que solo se empleó uno de los sensores de captación.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



Se muestra en la Figura 23 la tarjeta de adquisición.



FIGURA 23. TARJETA DE ADQUISICIÓN MICRO-SHM

- Amplificadores de señal 26 dB.

Estos amplificadores son necesarios ya que la señal puede perderse a lo largo del cable de transmisión, se utiliza uno para cada sensor de emisión acústica, pero una vez más solo se utilizará uno para los ensayos realizados. Se muestra el amplificador en la Figura 24.



FIGURA 24. AMPLIFICADOR

- Cables de transmisión

Son los encargados de conectar el sensor de emisión acústica con la tarjeta de adquisición.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



5.5.2. Conceptos básicos de la emisión acústica

Cuando una probeta es sometida a un esfuerzo, como pueden ser en este caso la fuerza elegida por la prensa, el sistema de emisión acústica “escucha” el daño interno.

Cada cambio en el interior de la probeta da lugar a un evento, el cual se registra en el equipo como una onda donde se representan milivoltios frente al tiempo, en segundos

En un mismo ensayo pueden registrarse miles de eventos, el sistema analiza cada uno de ellos y cuantifica una serie de parámetros (17 en total). Los parámetros que el equipo detecta son los siguientes:

- Amplitude: altura máxima de pico expresada en dB.
- Counts: número de veces que la onda cruza el threshold (el threshold es el umbral que el usuario debe determinar).
- Time of hits: instante en que se excede por primera vez el threshold.
- AE duration: intervalo de tiempo entre el primer y último “Count”.
- Rise time: tiempo desde el primer “Count” hasta el pico máximo.
- Parametric: valor de los canales paramétricos en ese instante.
- Peak frequency: efectúa una FFT (Fast Fourier Transform) de la señal y devuelve la frecuencia dominante.
- Frequency centroid: primer momento de inercia.
- Average frequency: frecuencia media del evento calculada como “Counts”/Duration.
- Reverberation frequency: frecuencia media de la señal medida después del valor pico de la onda.
- Initiation frequency: frecuencia media de la señal desde el primer “Count” hasta el valor pico de la onda.
- Signal strength: integral de la señal del voltaje rectificadas sobre la duración del evento.
- Energy: versión escalada de Signal Strength para equivalencias con sistemas más antiguos.
- Absolute energy: medida en Julios de la energía real de un evento.
- RMS: valor eficaz medido en voltios.
- ASL: similar a RMS pero medido en decibelios.
- Counts to peak: número de “Counts” desde el inicio del evento (Time of Hit) hasta el valor pico.



5.5.3. Desarrollo de las pruebas

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo de utilizar el equipo de emisión acústica durante los ensayos de tracción indirecta y compresión es el de registrar los eventos que se dan dentro de la probeta antes de su rotura, y poder identificar gracias a ellos el momento en el que la probeta comienza a sufrir daños, es decir, la aparición de la micro-fracturación.

Para un correcto registro es necesario que la superficie sobre la que se coloca el palpador este completamente lisa. En el caso de las probetas de tracción esto era requisito indispensable también para realizar el ensayo de tracción indirecta por lo que no se deben modificar las probetas.

Una vez conectado el equipo e iniciado el programa en el ordenador portátil, se pegó el sensor a las probetas. En ambos casos, es importante utilizar un acoplante entre la probeta y el sensor, para que la “escucha” sea de la mejor calidad posible. Para ello se aplicará un gel para mejorar el acoplamiento entre el sensor y la probeta. Para evitar que tras la rotura el palpador se desprendiese con brusquedad y pudiera dañarse, se fija a la probeta con cinta aislante, como puede verse en la Figura 25.



FIGURA 25. PROBETA TRACCIÓN LISTA PARA ENSAYAR CON SENSOR DE EMISIÓN ACÚSTICA

Los datos del ensayo se obtienen en un fichero *.txt que se debe tratar para obtener los parámetros que sean de mayor interés.

Para el presente trabajo se ha decidido representar la Energía Absoluta en Julios. Proporcionando este valor la energía que se “escuchaba” en el interior de la probeta



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



durante la carga y rotura de la probeta. Se muestra a continuación en la Figura 26 un ejemplo de las gráficas que se obtienen en los ensayos.

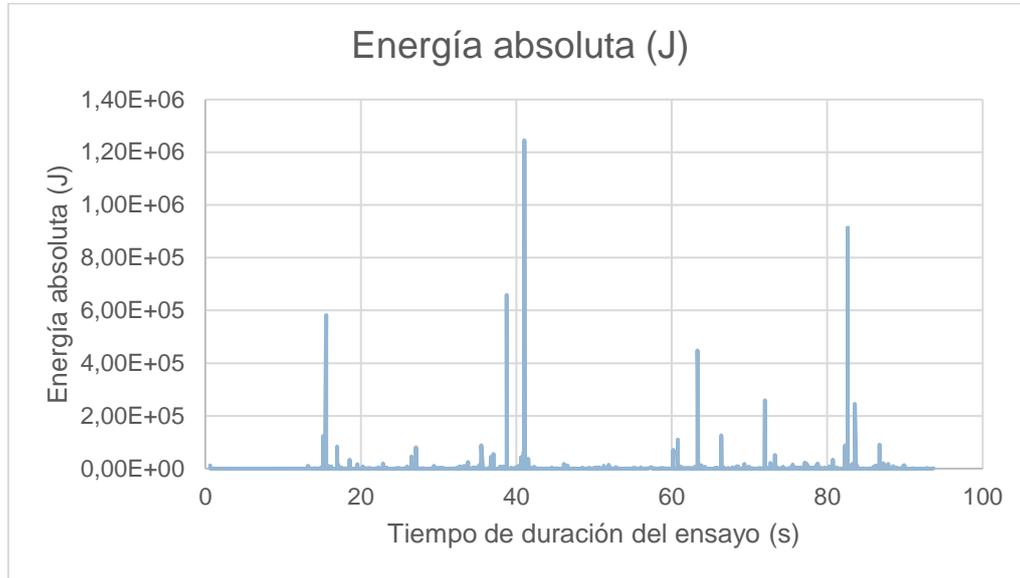


FIGURA 26. GRÁFICA TIPO DE ENERGÍA ABSOLUTA (PROBETA 7.2.).

5.6. Sensores de temperatura

Se instalaron sensores de temperatura en el interior de una de las probetas para registrar la temperatura durante el fraguado del hormigón, y además se dispuso otro sensor junto a la probeta para que midiese la tempera ambiente. Estos sensores registraron la temperatura a través de tarjetas de registro de datos denominadas Comet.

Periódicamente se fueron descargando los datos de temperatura.

El objetivo de este registro es el de conocer cómo va cambiando la temperatura dentro de la probeta para así conocer las condiciones de fraguado que se han ido dando con el paso del tiempo, esto puede proporcionar importantes datos a los ensayos.

Se muestra en la Figura 27 la COMET utilizada, y en la Tabla 7 las características técnicas de esta.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



FIGURA 27. COMET, DATA LOGGER

TABLA 7. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA COMET.

Technical data	Value
Measured value	Temperature Relative humidity Counted values (dew point...) Current Voltage Two-state signal Frequency Resistance Event logging
Total memory capacity	2MB (up to 480 000 values)
Memory type	internal SRAM, backed-up by Lithium battery
Data logging modes	noncyclic - logging stops after filling the memory cyclic - after filling memory oldest data is overwritten by new
Data logging interval	adjustable individually for all input channels from 1 second to 24 hours
Real time clock	year, leap year, month, day, hour, minute, second, backed-up by Lithium battery
Resolution of the AD converter (analog channels)	16 bits, conversion duration approximately 60ms/channel



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



Communication speed	9600, 19200, 57600, 115200 Bd, 230400* Bd (* applicable for USB, Ethernet)
Power	24Vdc, consumption of data logger itself approximately 80 mA
Operating temperature range	0 to +50°C
Dimensions including connectors	215 x 225 x 44 mm (W x D x H)
Protection	IP20
Weight	approximately 800 g
Warranty	3 years



6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez llevados a cabo todos los ensayos descritos anteriormente, se realizó el tratamiento y análisis de los resultados obtenidos. La captación de datos de las prensas se llevó a cabo mediante el software DEWESoftX2 que permitió almacenar los datos de la fuerza ejercida por las células de carga instaladas en ambas prensas. Estos datos fueron tratados después con Microsoft Excel. La herramienta de emisión acústica, como se ha comentado anteriormente, proporcionó los datos en fichero *.txt que posteriormente se trató con Microsoft Excel también.

Los resultados obtenidos de dicho tratamiento se han clasificado en tres grupos diferentes, en función del tipo de ensayo realizado y de las conclusiones que se buscaba obtener de cada uno de ellos. Los grupos son:

- Evolución de la resistencia a compresión simple con el tiempo de fraguado.
- Evolución de la resistencia a tracción indirecta con el tiempo de fraguado.
- Análisis de la influencia de los periodos de vibración a lo largo del fraguado en la resistencia a tracción indirecta.

Se presentan a continuación unas tablas que resumen la nomenclatura que se les ha dado a las probetas.

Todos los nombres de las probetas están compuestos por 2 dígitos, separados por puntos. Se muestra en la Tabla 8 el valor del primer dígito, que varía según el día en el que ha sido ensayada. Y en la Tabla 9 el segundo dígito, que varía según la duración de las vibraciones a las que la probeta se ha visto sometida.

TABLA 8. PRIMER DÍGITO (X) DEL NOMBRE DE LAS PROBETAS.

DÍA DE FRAGUADO	15 horas	24 horas	48 horas	72 horas	8 días	10 días	14 días	28 días
HORA DE FRAGUADO	15 horas	24 horas	48 horas	72 horas	192 horas	240 horas	336 horas	672 horas
PRIMER DÍGITO	1	2	3	4	5	6	7	8



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



TABLA 9. SEGUNDO DÍGITO (Y) DEL NOMBRE DE LAS PROBETAS.

DURACIÓN DE LAS VIBRACIONES	1 MINUTO	5 MINUTOS	10 MINUTOS
SEGUNDO DÍGITO	1	2	3

La *probeta 4.2.* será, por tanto, aquella que ha sido ensayada pasadas 72 horas desde el inicio del fraguado y que ha sido sometida a 5 minutos de vibraciones.

Los patrones solo tienen un dígito ya que no han sido vibrados, este será el correspondiente al día en el que se ensayaron, según la Tabla 8.

6.1. Evolución de la resistencia a compresión simple con el tiempo de fraguado

Estos ensayos se realizaron en la prensa automática ya que la carga necesaria para romper estas probetas no se alcanzaba con la prensa manual.

En la Tabla 10 se muestran los datos obtenidos de las resistencias a compresión del material en los diferentes momentos del fraguado.

TABLA 10. RESISTENCIAS A COMPRESIÓN SIMPLE DE LAS PROBETAS EN MPA.

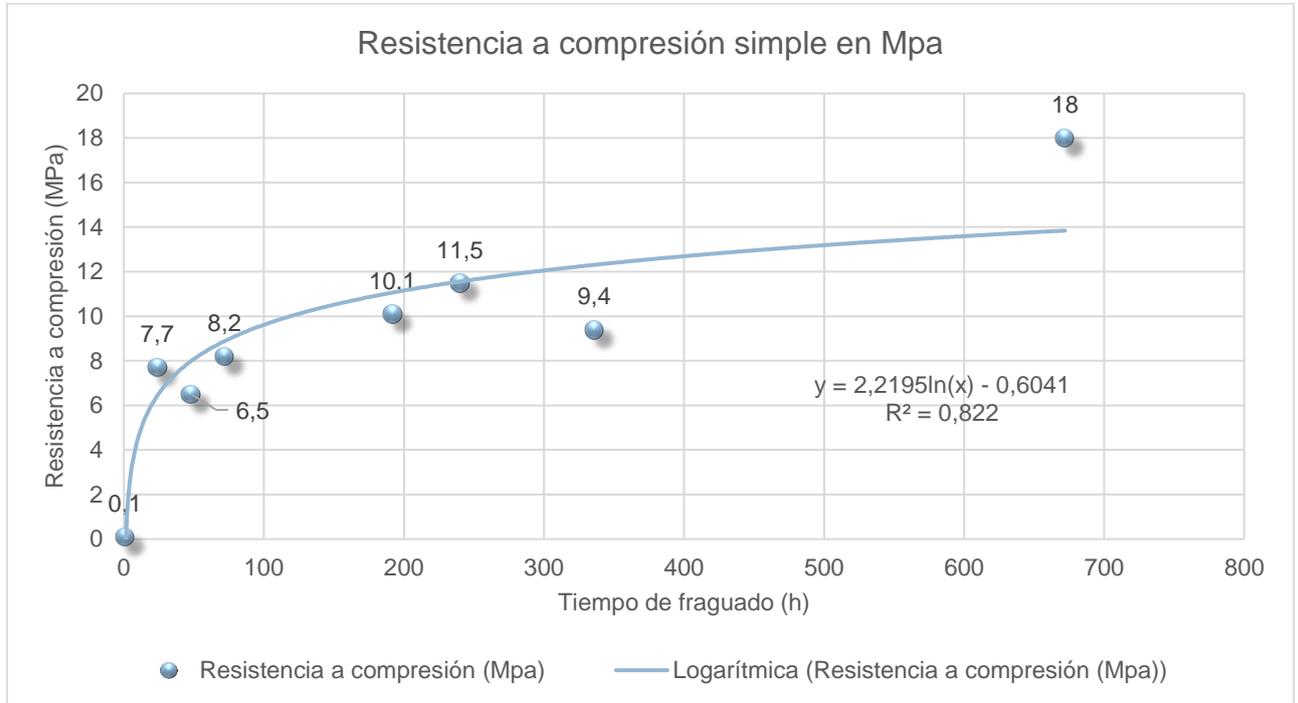
Tiempo	Tiempo (h)	Resistencia a compresión (MPa)
	1	0,1
24 horas	24	7,7
48 horas	48	6,5
72 horas	72	8,2
8 días	192	10,1
10 días	240	11,5
14 días	336	9,4
28 días	672	18



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



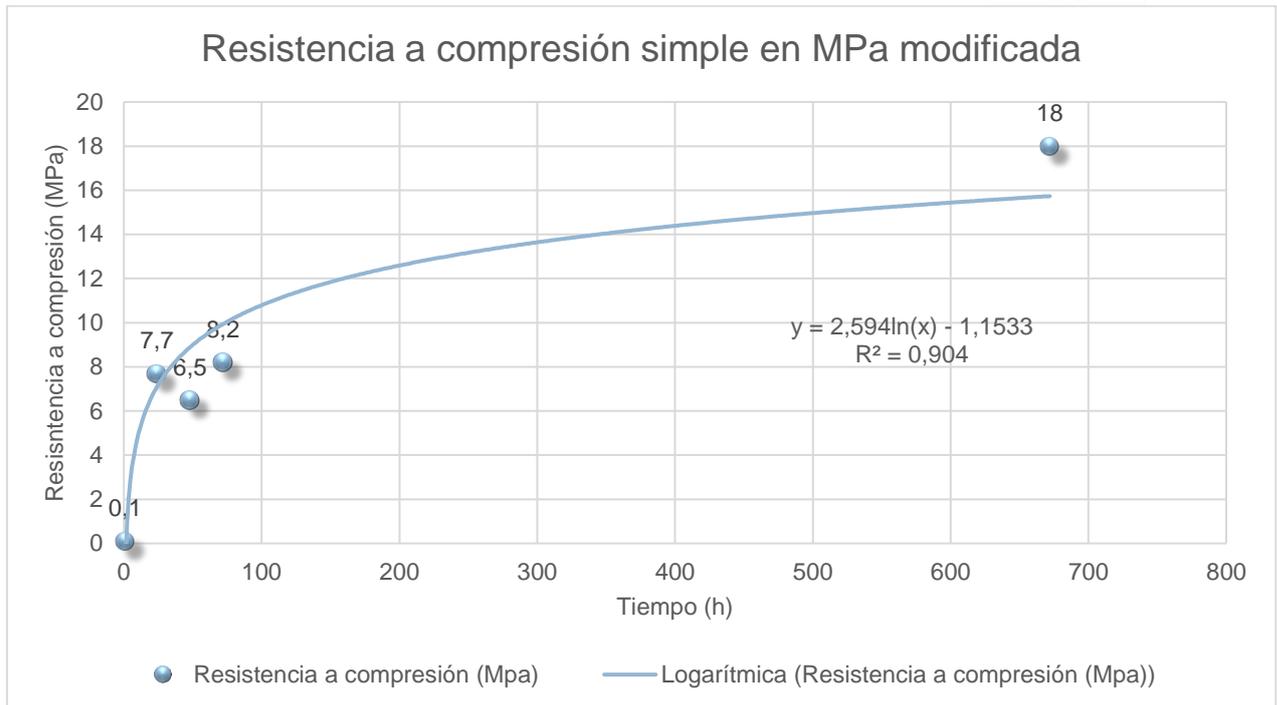
Se han representado los datos de la Tabla 10 en la Gráfica 2 junto con su línea de tendencia.



GRÁFICA 2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE EN MPA.

La tendencia de la resistencia a compresión de las probetas ensayadas es claramente ascendente. Sin embargo, hay tres puntos los correspondientes a los 8,10 y 14 días que tienen un comportamiento anómalo respecto al resto. En efecto, a los 14 días se esperaba que la resistencia del material a compresión fuese mucho más parecida a la resistencia característica (la de 28 días, 18 MPa), puesto que en la mezcla se utilizó acelerante. Sin embargo, no se cumple esta expectativa, la resistencia alcanzada el día 14 es muy baja en relación con la de 28 días. Una de las razones por las que esto puede darse es que el acelerante utilizado para la realización de la mezcla no estaba en óptimas condiciones y no ha proporcionado a la mezcla las prestaciones esperadas al 100%. Esta hipótesis se ha comprobado a posteriori, al detectar que el producto acelerante estaba caducado.

Se representan en la Gráfica 3 los datos sin estos puntos anómalos y se puede comprobar como el ajuste en este caso es mucho mejor.



GRÁFICA 3. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE EN MPa CORREGIDA.

Además, esta disparidad de comportamientos en la resistencia a compresión puede venir asociada a varias causas:

- En primer lugar, es imposible garantizar la homogeneidad del material y de las probetas. Simplemente el hecho de que la mezcla se haya vertido en el molde antes o después puede haber generado pequeños fenómenos de segregación o afectar a la hidratación incipiente. Es imposible garantizar también que el compactado en los moldes haya sido idéntico.
- Además, como se ha comentado si el acelerante no estaba en perfectas condiciones puede haber actuado de forma aleatoria en unas y otras probetas.
- Las condiciones ambientales en las que se ha desarrollado el fraguado han ido evolucionando en el tiempo, puesto que ni la temperatura ni la humedad se han mantenido.

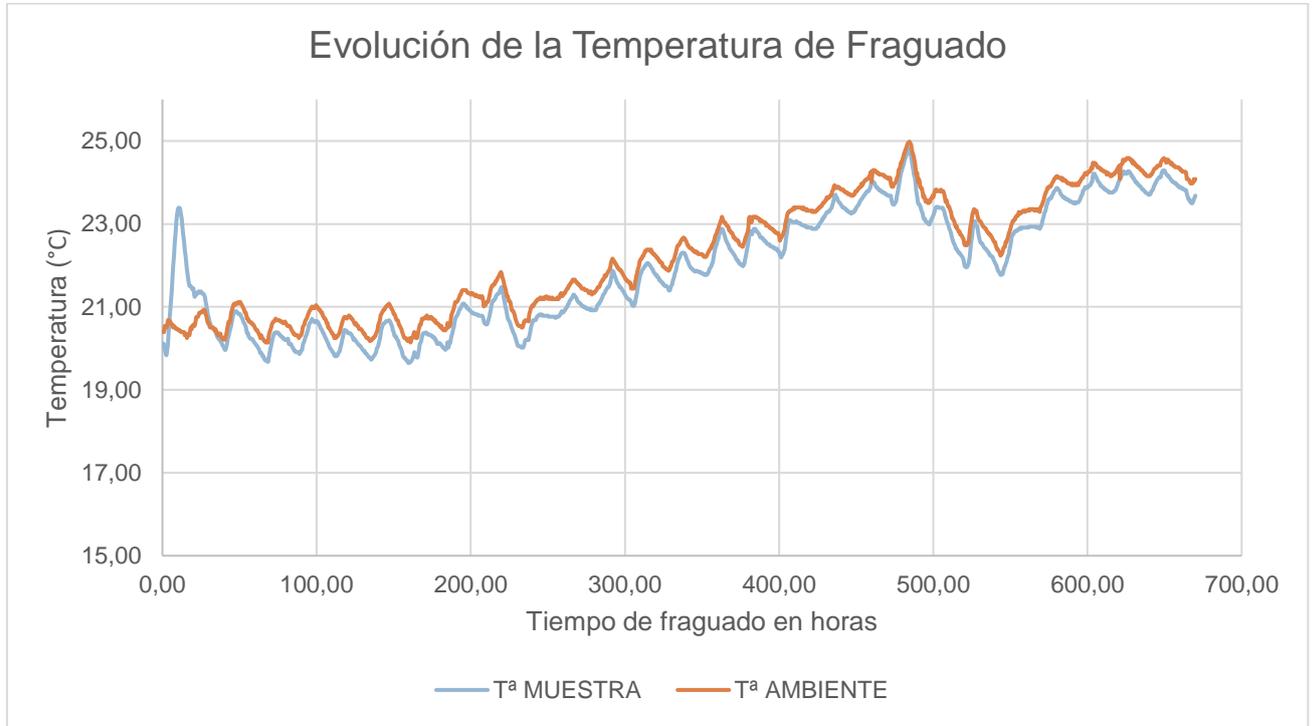
Como se ha comentado a lo largo del trabajo, se tomó la temperatura en el interior de una de las probetas y en el ambiente a lo largo del periodo de ensayos para poder conocer las variaciones en la temperatura durante el fraguado del hormigón. En la



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



Gráfica 4 se representa la evolución de la temperatura en grados centígrados a lo largo del periodo en el que se realizaron los ensayos.



GRÁFICA 4. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DE FRAGUADO.

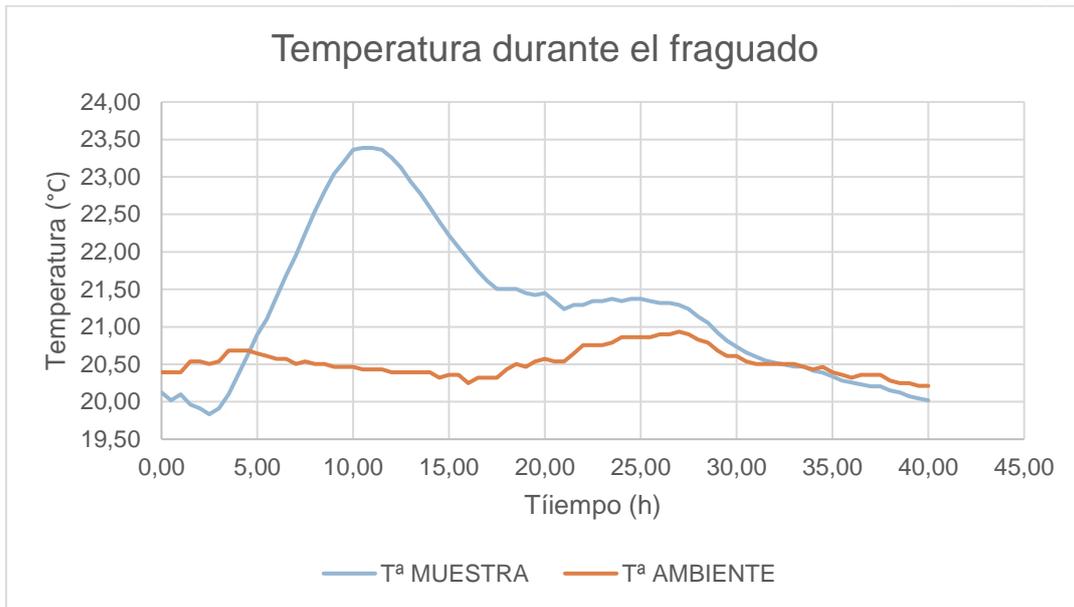
De la Gráfica 4 se puede ver cómo la probeta sigue en todo momento la temperatura ambiente, y no muestra ningún cambio relevante en general.

Haciendo una comparación con la Gráfica 2 no se encuentra ninguna relación en cuanto a temperatura que puedan arrojar algo de información acerca de esos casos anómalos, desde las 192 horas hasta las 336 horas (8, 10 y 14 días) la temperatura no muestra ningún cambio significativo.

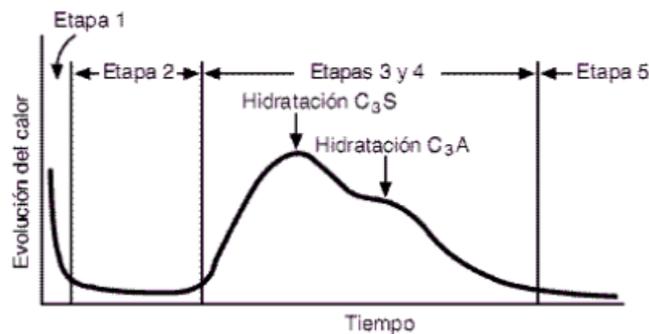
Sin embargo, en las primeras 40 horas de fraguado, existe un aumento de temperatura significativo de, aproximadamente, 3 °C, como puede comprobarse en la Gráfica 5. Es en estas horas donde la temperatura de la probeta sigue una gráfica muy similar a la Gráfica 6.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



GRÁFICA 5. DETALLE DE LA GRÁFICA DE TEMPERATURA.



GRÁFICA 6. EVOLUCIÓN DEL CALOR VS TIEMPO

En la Gráfica 6 se representan diferentes etapas dentro del proceso de fraguado, que pueden coincidir con el fenómeno que ocurre en la probeta contralada.

La etapa 1 es el momento en el que el C_3S ($3CaOSiO_2$: silicato tricálcico) y C_3A ($3CaOAl_2O_2$: aluminato tricálcico) se hidratan. La etapa 2 corresponde a un periodo de incubación. La etapa 3 es una hidratación acelerada de los productos de hidratación esta determina la tasa de endurecimiento del hormigón y la etapa 4 se frena la formación de productos de hidratación. La etapa 5 es la más lenta, en este punto la formación de productos de hidratación se vuelve estable y se estabiliza la resistencia.



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



En la Gráfica 5 puede verse, como durante las primeras 40 horas de fraguado, se da un fenómeno en la temperatura muy similar al explicado.



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



6.2. Evolución de la resistencia a tracción indirecta con el tiempo de fraguado

Para conocer el avance de la resistencia a tracción de las probetas con el tiempo, se llevaron a cabo una serie de 8 ensayos de tracción indirecta. Estas probetas son las tomadas como patrón, ya que no fueron sometidas a vibraciones, y se utilizan como base para poder comparar con las vibradas. Durante estos ensayos se realizó un control de emisión acústica.

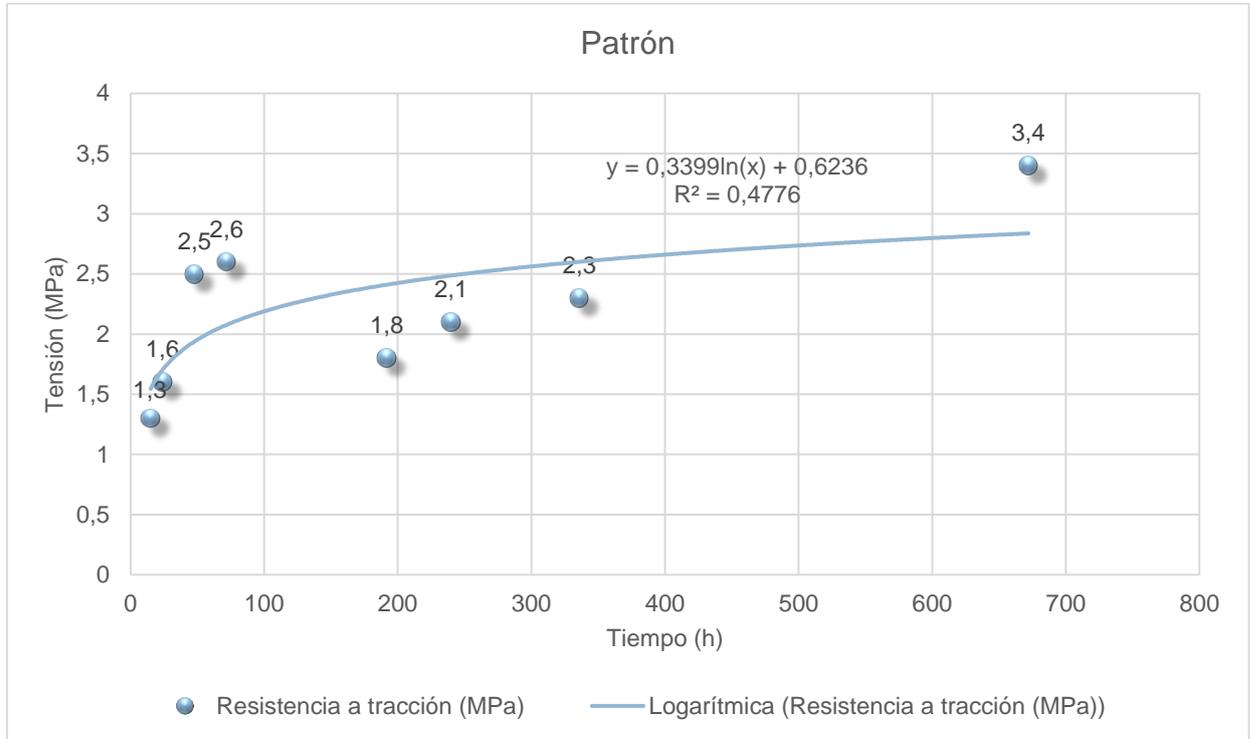
En la Tabla 11 se muestran los datos de las tensiones soportadas por los patrones a lo largo del fraguado.

TABLA 11. RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA DE LOS PATRONES EN MPA.

Tiempo	Tiempo en horas	Resistencia a tracción (MPa)
15 horas	15	1,3
24 horas	24	1,6
48 horas	48	2,5
72 horas	72	2,6
8 días	192	1,8
10 días	240	2,1
14 días	336	2,3
28 días	672	3,4

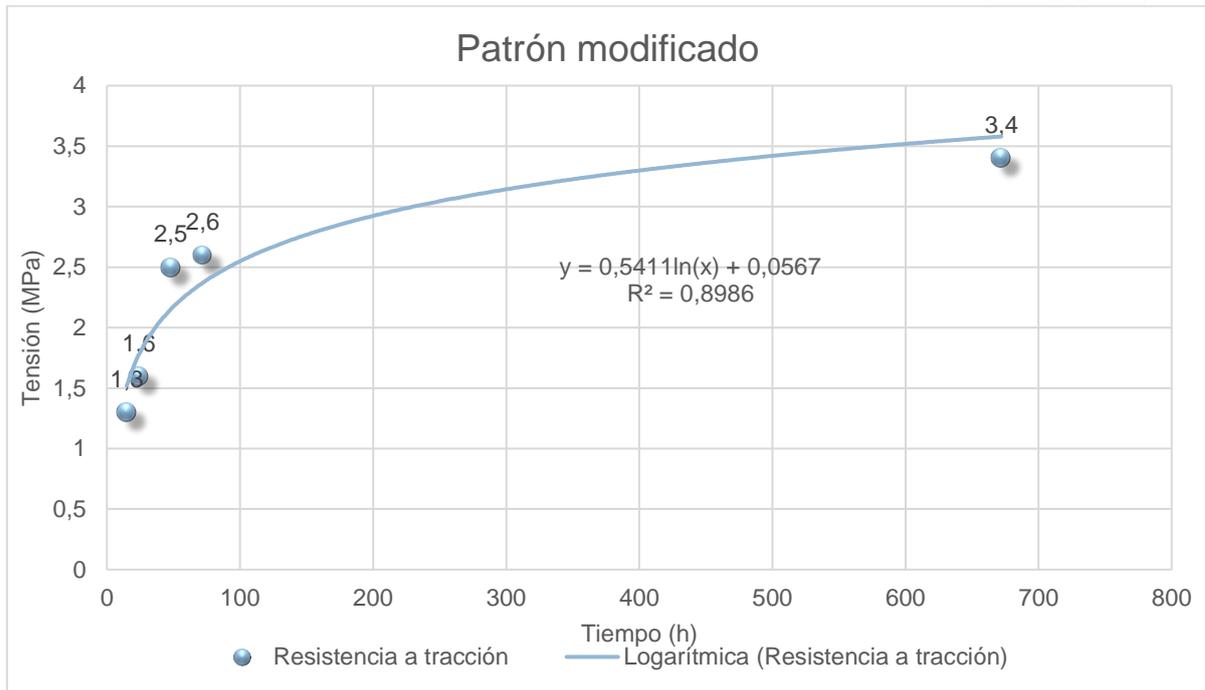


Representando los datos de la Tabla 11 y su línea de tendencia, se obtiene la Gráfica 7 de la evolución de la resistencia a tracción indirecta.



GRÁFICA 7. RESISTENCIA A TRACCIÓN DURANTE EL FRAGUADO EN MPA.

En el caso de la resistencia a tracción, al igual que con la resistencia a compresión simple, la tendencia es ascendente. La resistencia máxima, que se alcanza tras 28 días de fraguado, es de 3,4 MPa. Como se puede apreciar existen tres puntos anómalos, hecho que también se daba en la evolución de la resistencia a compresión. Estos puntos hacen que la tendencia de la curva disminuya ya que a los 14 días se obtiene una resistencia muy baja. Se trata de las probetas ensayadas al cabo de 8, 10 y 14 días. Si se eliminan estos puntos anómalos y se representan los restantes (Gráfica 8) la tendencia de la curva mejora significativamente. La resistencia a los 14 días sustituyendo 336 horas (14 días) en la ecuación de la recta, será de 3,71 MPa, resistencia que se encuentra mucho más cercana a la característica (3,4 MPa) que, en el caso del valor real en ese punto, que era 2,3 MPa.



GRÁFICA 8. RESISTENCIA A TRACCIÓN DURANTE EL FRAGUADO EN MPA MODIFICADA.

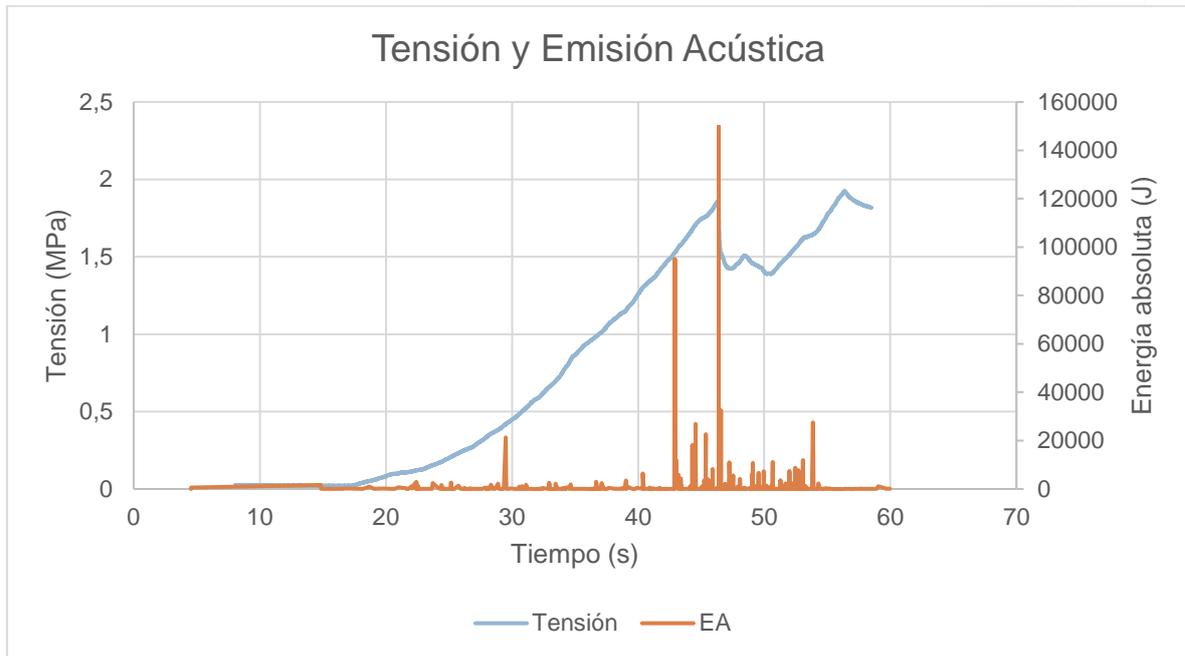
Emisión acústica en los ensayos de tracción indirecta

Como se ha comentado anteriormente, mientras se realizaron los ensayos de tracción un sensor de emisión acústica se instaló en las probetas. Para el tratamiento y análisis de los datos de estos ensayos se representó por un lado la curva de tensión-tiempo de todas las probetas con los datos grabados en la tarjeta DEWE a partir del software DEWESoftX2, y, por otro lado, se representó la energía absoluta en Julios de cada evento de emisión acústica que se registró mediante el equipo de control. Este parámetro representa la energía que el sensor ha captado en cada una de las emisiones detectadas en el interior de la probeta mientras transcurre el ensayo.

Ambas gráficas se combinaron, como se muestra en la Gráfica 9.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



GRÁFICA 9. REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE UN ENSAYO.

Analizando dicha gráfica se puede saber la energía absoluta liberada en el momento en el que se produce la rotura de la probeta.

Gracias a la gráfica de emisión acústica se detectan fenómenos de liberación de energía puntuales, a cargas más bajas que las de rotura, que indican en qué momento se van generando microgrietas.

Cuando una probeta comienza a sufrir daños importantes en su interior la actividad de emisión acústica aumenta notablemente, lo que se traduce en una mayor cantidad de eventos de mayor energía. El aumento en la cantidad de eventos representa que los daños en el interior de la probeta aumentan, no tanto en magnitud, sino en frecuencia y cantidad. El aumento de su energía indicaría que los daños son de mayor envergadura.

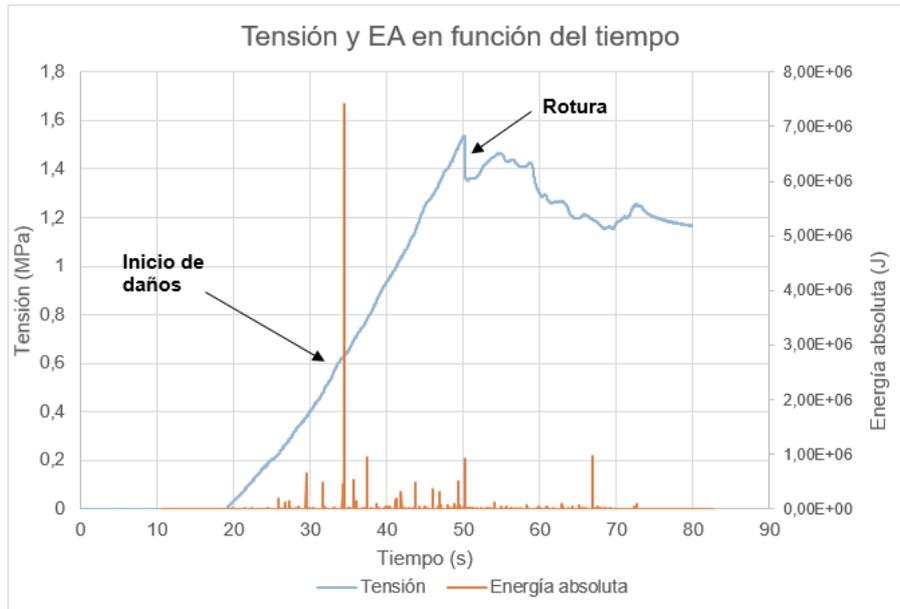
En la Gráfica 10, la cual corresponde a la Probeta 6.2., es decir, probeta ensayada pasados 10 días y vibrada durante 5 minutos, se puede ver un ejemplo de las gráficas de tensión y emisión acústica combinadas para estos ensayos. Además, puede verse también como en el segundo 34,46 del ensayo, apareció una fuerte actividad en el interior de la probeta y a partir de ese punto la emisión acústica es más frecuente. Se determina así la tensión a partir de la cual la muestra empieza a sufrir daños.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.

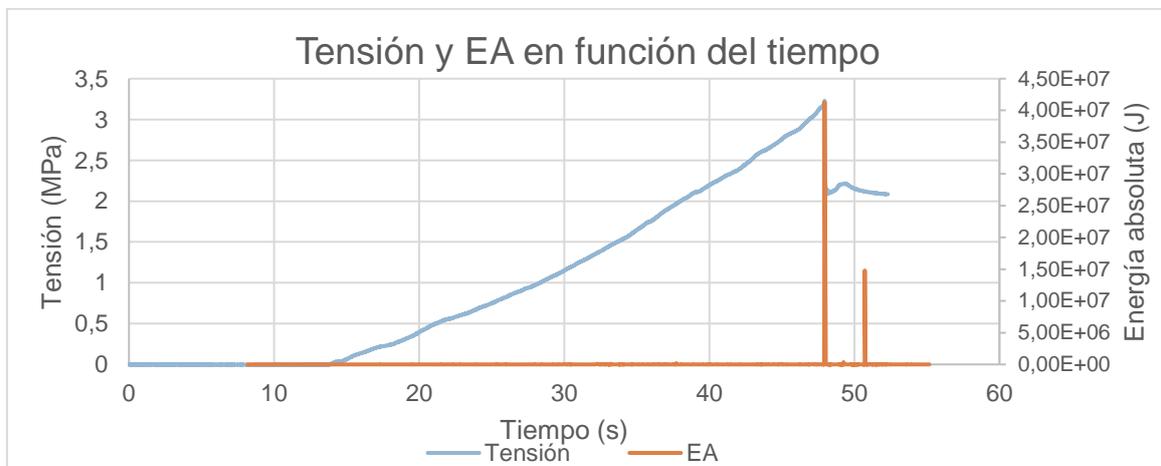


Además, se puede ver también lo anteriormente comentado, la rotura de la probeta viene representada por un descenso en picado de la curva tensión, aunque en este caso no viene acompañada de un evento importante de emisión acústica.



GRÁFICA 10. EA Y TENSIÓN DE LA PROBETA 6.2.

Sin embargo, no todas las probetas mostraron un patrón tan claro para la determinación del momento en el que el material comienza a sufrir daños. Hay algunos casos, como en el de la Gráfica 11 perteneciente a la probeta ensayada a 28 días y vibrada durante 5 minutos, en los que la emisión acústica en el momento de rotura tiene un valor tan grande que no deja ver la actividad acústica que aparece antes.



GRÁFICA 11. PROBETA 8.2.

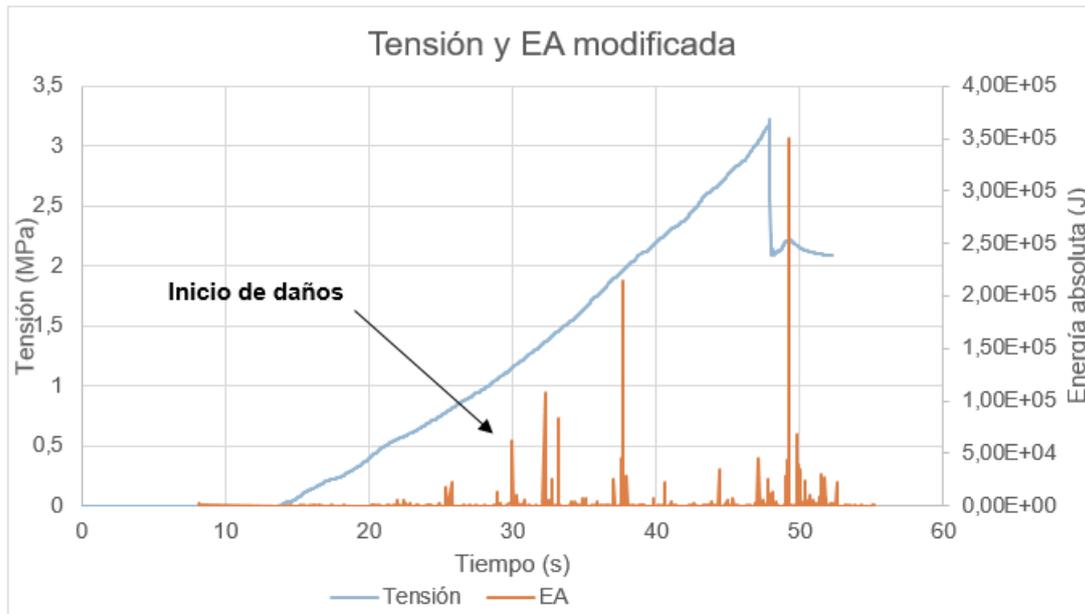


Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



En los casos en los que esto sucedía, la manera más eficaz para poder ver el punto en el que las probetas comenzaban a experimentar daños era eliminar de manera temporal el punto de emisión acústica más alto.

Se muestra en la Gráfica 12 que sigue a continuación, la modificación de la Gráfica 11, para poder ver los picos de emisión acústica de menor magnitud.



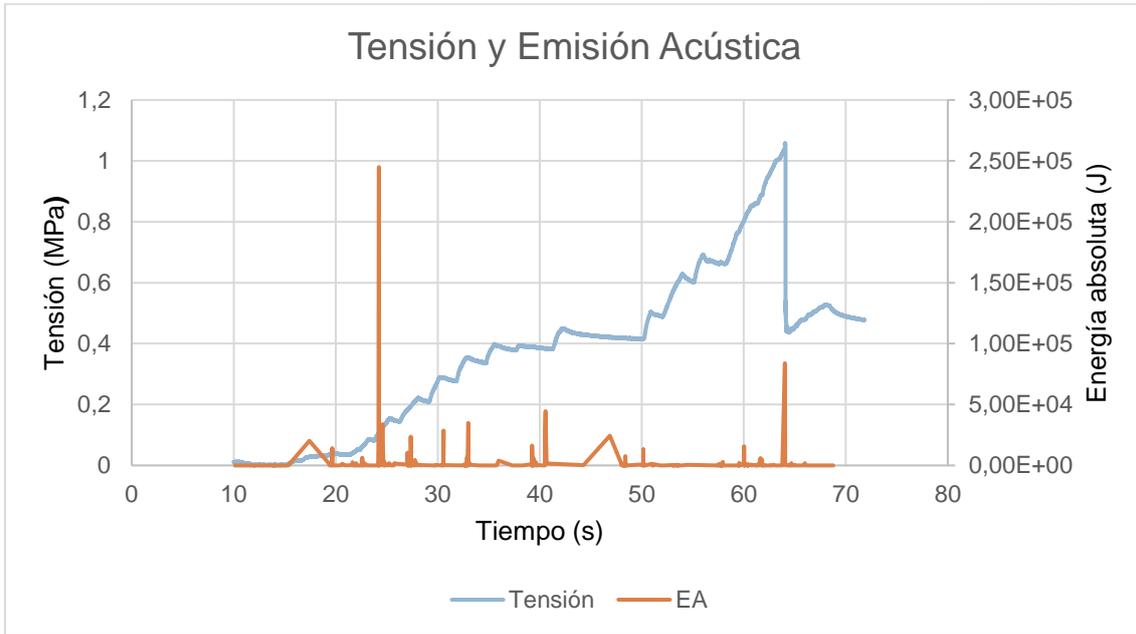
GRÁFICA 12. PROBETA 8.2. MODIFICADA.

Analizando todas las gráficas de este tipo obtenidas, en alguna de ellas la curva tensión-tiempo toma una forma diferente a la usual. Se describen y comentan a continuación estos casos que merecen una atención especial.

En primer lugar, dos de las probetas ensayadas tras 15 horas del inicio del fraguado, muestran una trayectoria escalonada, la sometida a 1 minuto de vibración y la vibrada durante 5 minutos. Se muestra, a modo de ejemplo la Gráfica 13 (correspondiente a la vibrada durante 1 minuto). Es muy interesante comprobar cómo cada escalón se corresponde con un evento de emisión acústica, es decir, parece vinculado a la generación o crecimiento de fracturas.

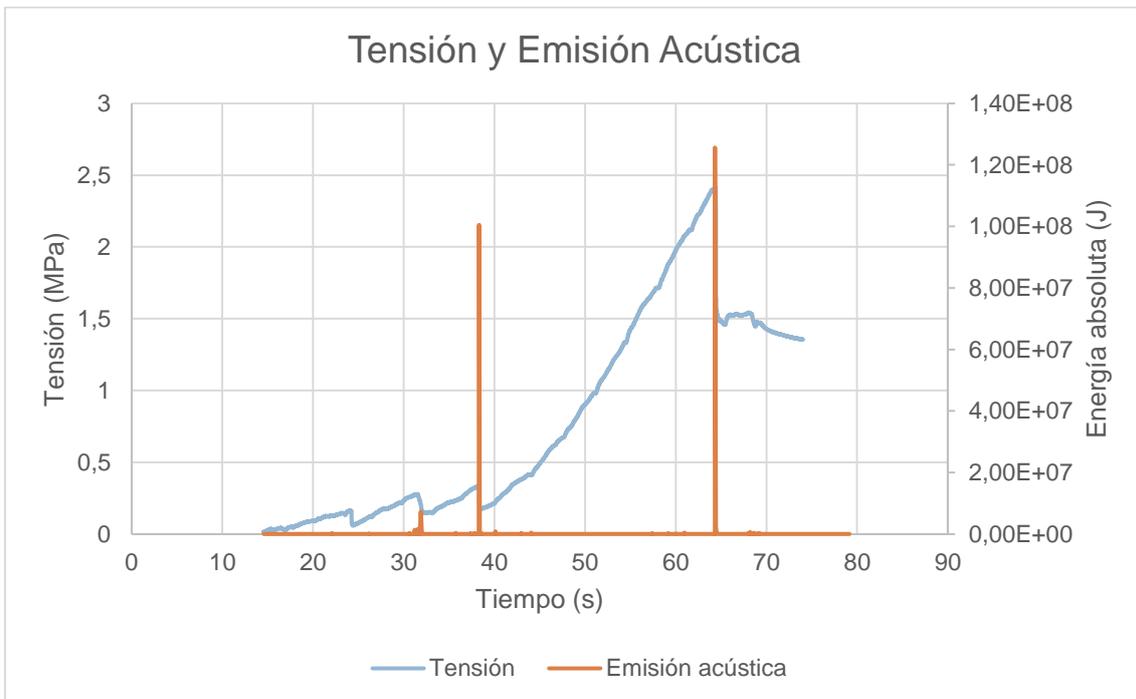


Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



GRÁFICA 13. PROBETA 1.1.

Esta anomalía también aparece en la probeta 5.3, vibrada durante 10 minutos tras 8 días de fraguado, si bien sólo se aprecia esta forma escalonada en el tramo inicial del ensayo (se puede ver en la Gráfica 14).



GRÁFICA 14. PROBETA 5.3.

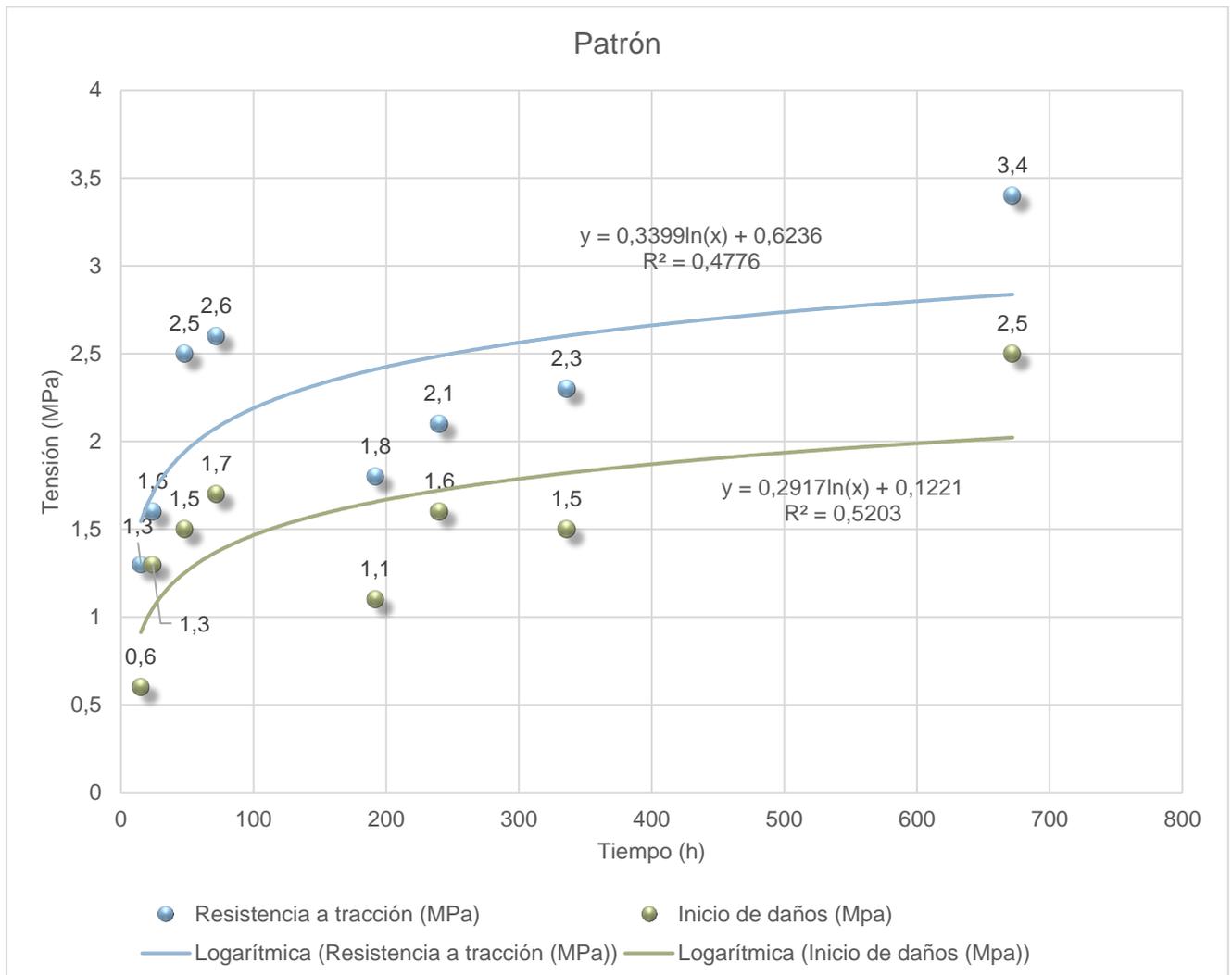


Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



Uno de los escalones en este caso, viene además acompañado de un evento de emisión acústica de gran magnitud (comparable al evento de rotura final), con una energía de unos 100 MJ.

Analizando de esta manera los ensayos llevados a cabo en los **patrones**, se añadieron a la Gráfica 7 , las tensiones a las cuales se comenzaban a apreciar daños relevantes en la probeta. Se obtuvo así la Gráfica 15, en la que se representa la curva de inicio de daños en función del tiempo de fraguado. En la curva de inicio de daños se puede ver al igual que en la de rotura cómo hay tres puntos anómalos que no siguen la tendencia del resto.



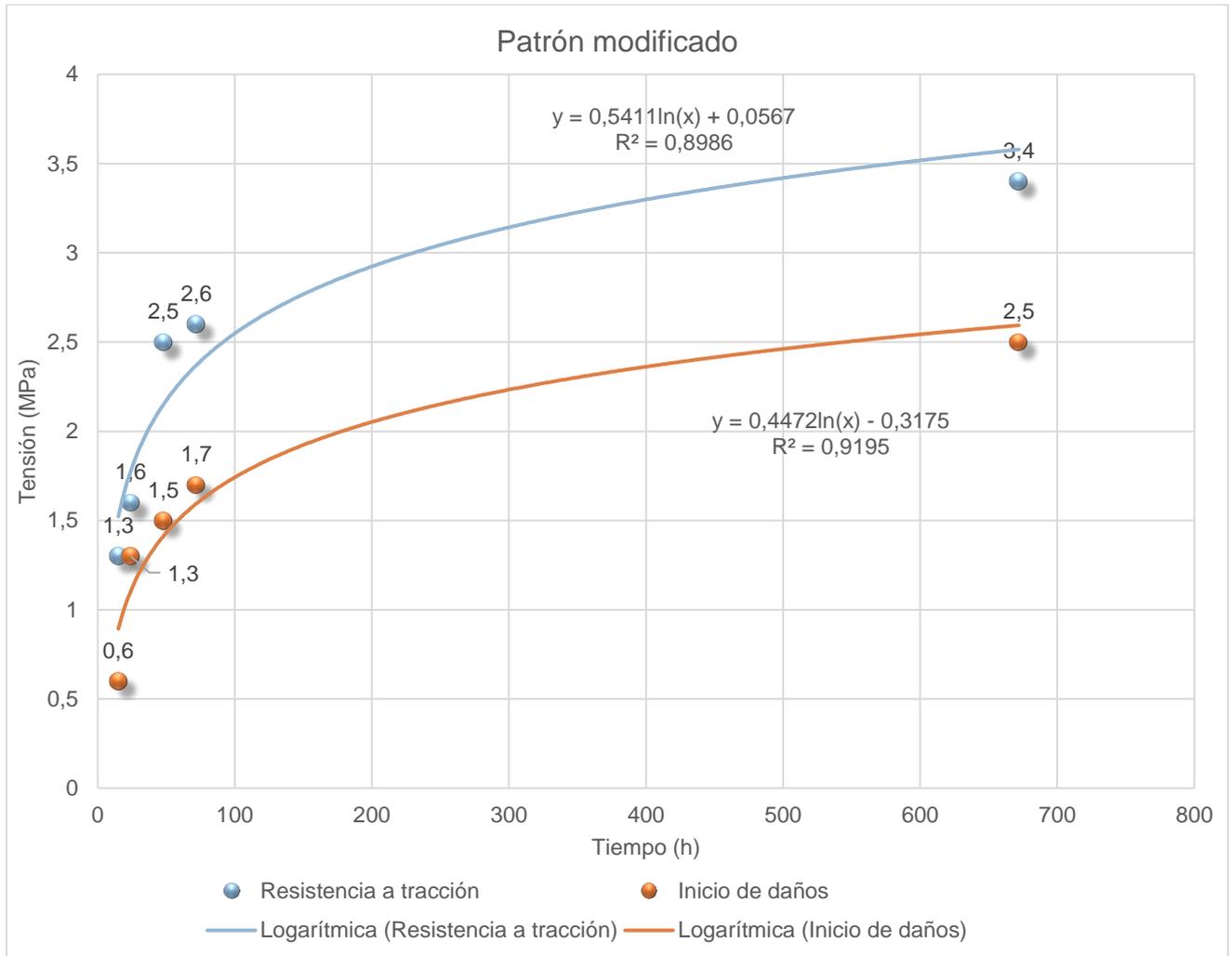
GRÁFICA 15. COMPARACIÓN RESISTENCIA A TRACCIÓN PATRÓN.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



Modificando la Gráfica 15, para eliminar los tres puntos anómalos, se obtiene la Gráfica 16 en la cual, ya puede verse la clara tendencia ascendente de la resistencia a tracción. También se puede estimar una resistencia a los 14 días más parecida a la resistencia característica, ya que sustituyendo en la ecuación de la curva de inicio de daños el tiempo, se obtiene una resistencia de 2,22 MPa.



GRÁFICA 16. COMPARACIÓN RESISTENCIA A TRACCIÓN PATRÓN MODIFICADO.

Las razones por las que puede darse la aparición de probetas que muestran resultados anómalos en los ensayos son las mismas que en el caso de la resistencia a compresión simple, ya comentadas en el apartado anterior.



6.3. Influencia de las vibraciones en la resistencia a tracción

El primer resultado que se obtiene de los ensayos realizados es el análisis visual. Comprobar la forma en la que han roto las probetas puede ser de gran ayuda para saber si siguen un comportamiento normal. En el caso de las probetas rotas mediante el ensayo de tracción indirecta todas ellas rompen siguiendo el patrón establecido en este tipo de ensayos, un corte recto central con la posibilidad de aparecer algún pequeño desvío en alguna de las esquinas. Se puede ver como ejemplo la probeta 4.3. en la Figura 28.



FIGURA 28. PROBETA 4.3.

Se van a presentar a continuación tres gráficas que corresponden a las probetas vibradas durante 1 minuto, las vibradas 5 minutos y las vibradas 10 minutos. En todas ellas aparece la evolución de la tensión que las probetas eran capaces de aguantar en MPa hasta el momento de la rotura, y los MPa a los cuales las probetas comenzaban a sufrir daños importantes, habiendo determinado este último aspecto mediante la emisión acústica de la misma manera que en el caso del patrón.

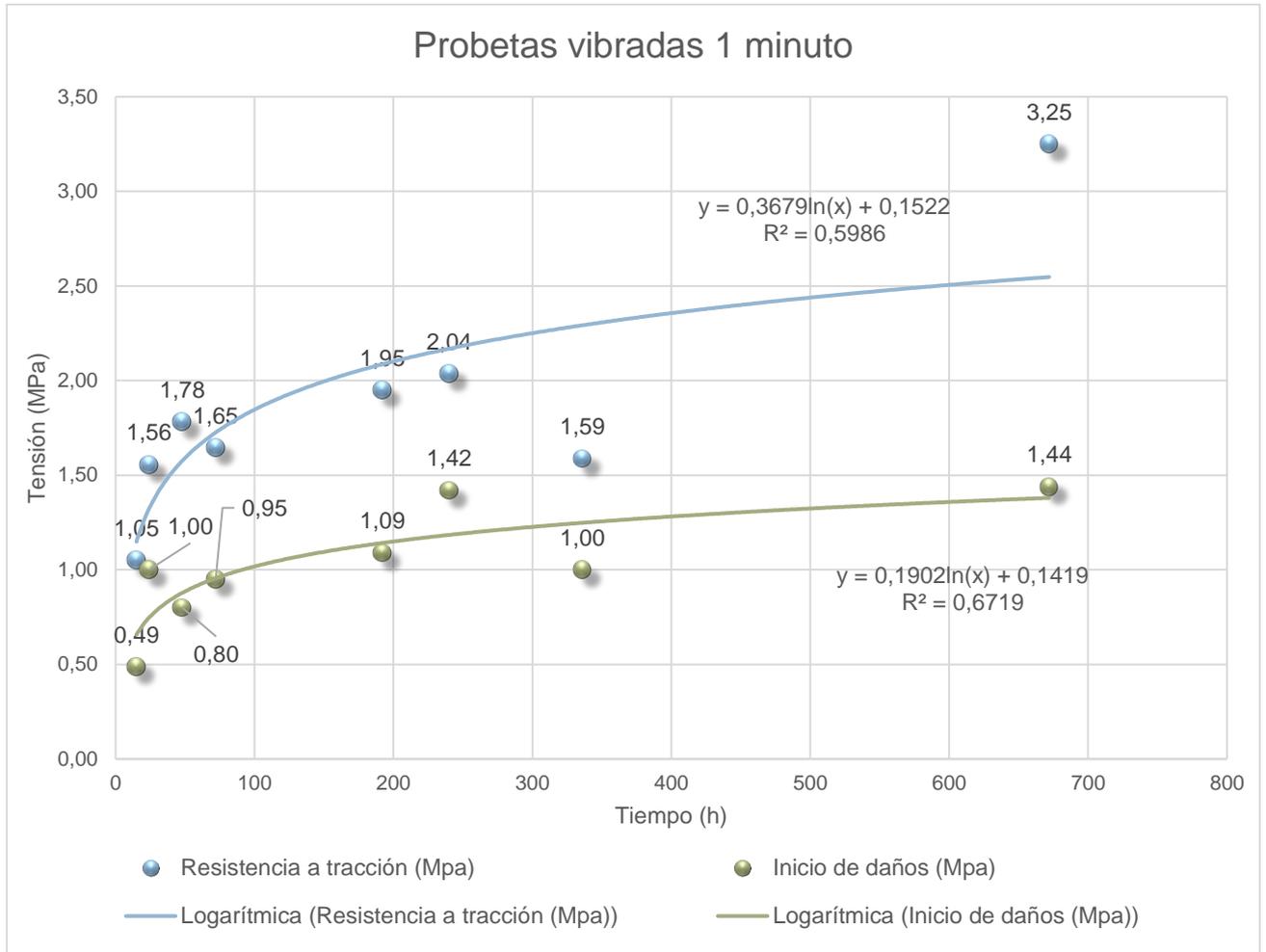


Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



Probetas vibradas durante 1 minuto

Se muestra en la Gráfica 17 la evolución de la resistencia a tracción de las probetas y las tensiones a las que se iniciaron los daños.



GRÁFICA 17. PROBETAS VIBRADAS DURANTE 1 MINUTO.

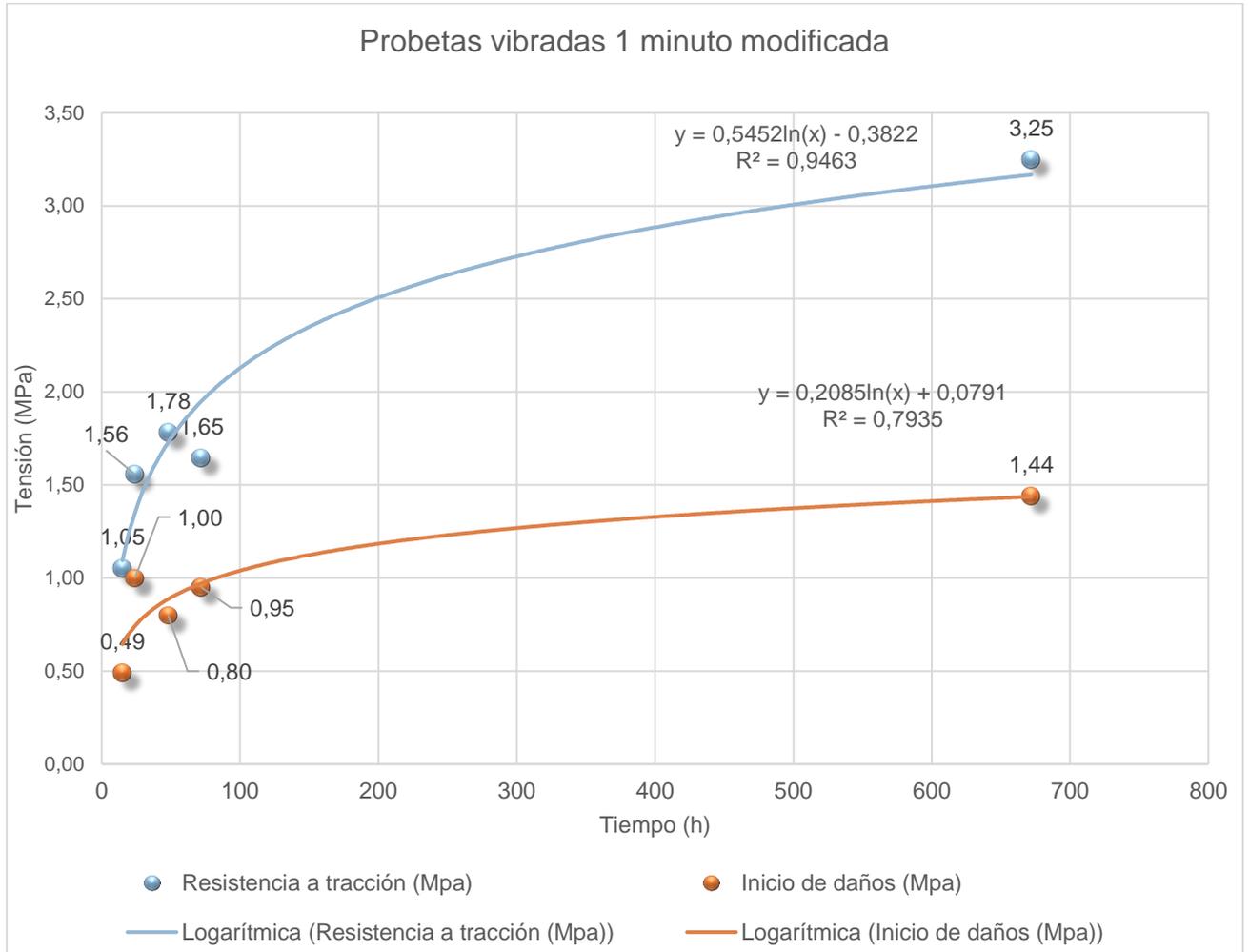
Como sucede en los demás casos, los días 8,10 y 14 desvían notablemente la tendencia de la resistencia hacia valores más bajos. Sin embargo, en la curva de inicio de daños, este hecho no se ve con tanta claridad, aunque atendiendo a la resistencia alcanzada tras 14 días, en los ensayos la probeta dio un valor de 1 MPa punto que está alejado del 1,44 MPa que soportó tras 28 días.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



Se eliminaron los puntos anómalos, y se representó de nuevo el resultado en la Gráfica 18.



GRÁFICA 18. PROBETAS VIBRADAS 1 MINUTO MODIFICADAS.

Tras eliminar los puntos anómalos, puede verse de nuevo como el ajuste es más exacto. En el caso de la curva de rotura, al sustituir en la ecuación de la curva 336 horas, es decir, 14 días, se obtiene una resistencia de 2,77 MPa, resistencia más acorde a la tendencia de la resistencia, recordar que en el caso del punto anómalo esta era de 1,59 MPa. Para la curva de inicio de daños, el valor que se obtendría es de 1,29 MPa, muy cercano a la resistencia a los 28 días (1,44 MPa).

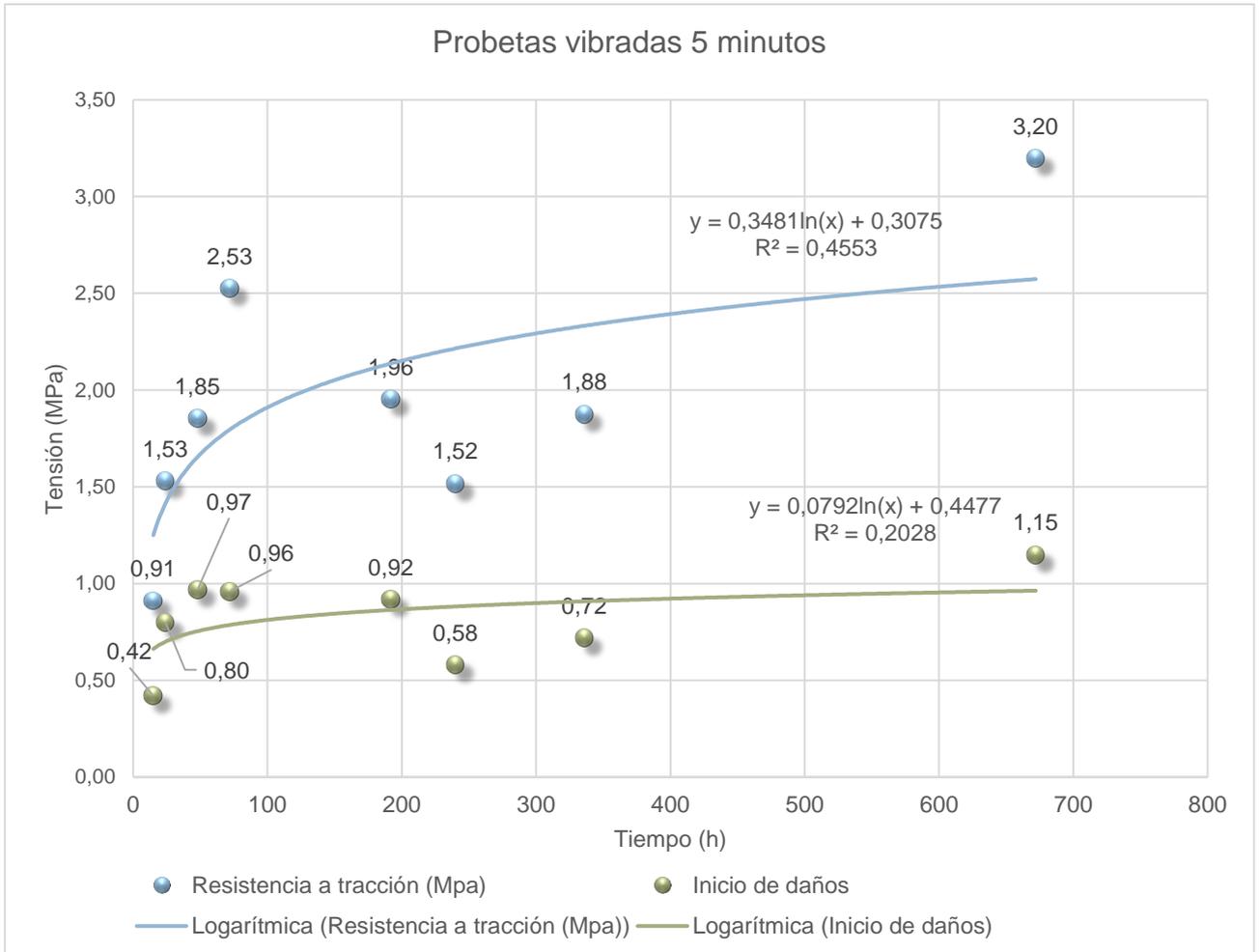
Probetas vibradas durante 5 minutos



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



Con las probetas vibradas durante 5 minutos se realizó un análisis igual al del caso anterior. Se representaron los puntos correspondientes a la resistencia a tracción de la probeta en los diferentes puntos del fraguado, y se representaron aquellos puntos en los que los daños comenzaban a ser más importantes. Insertando en el gráfico una curva de tendencia logarítmica, para conseguir el mejor ajuste posible se obtiene la Gráfica 19.



GRÁFICA 19. PROBETAS VIBRADAS 5 MINUTOS.

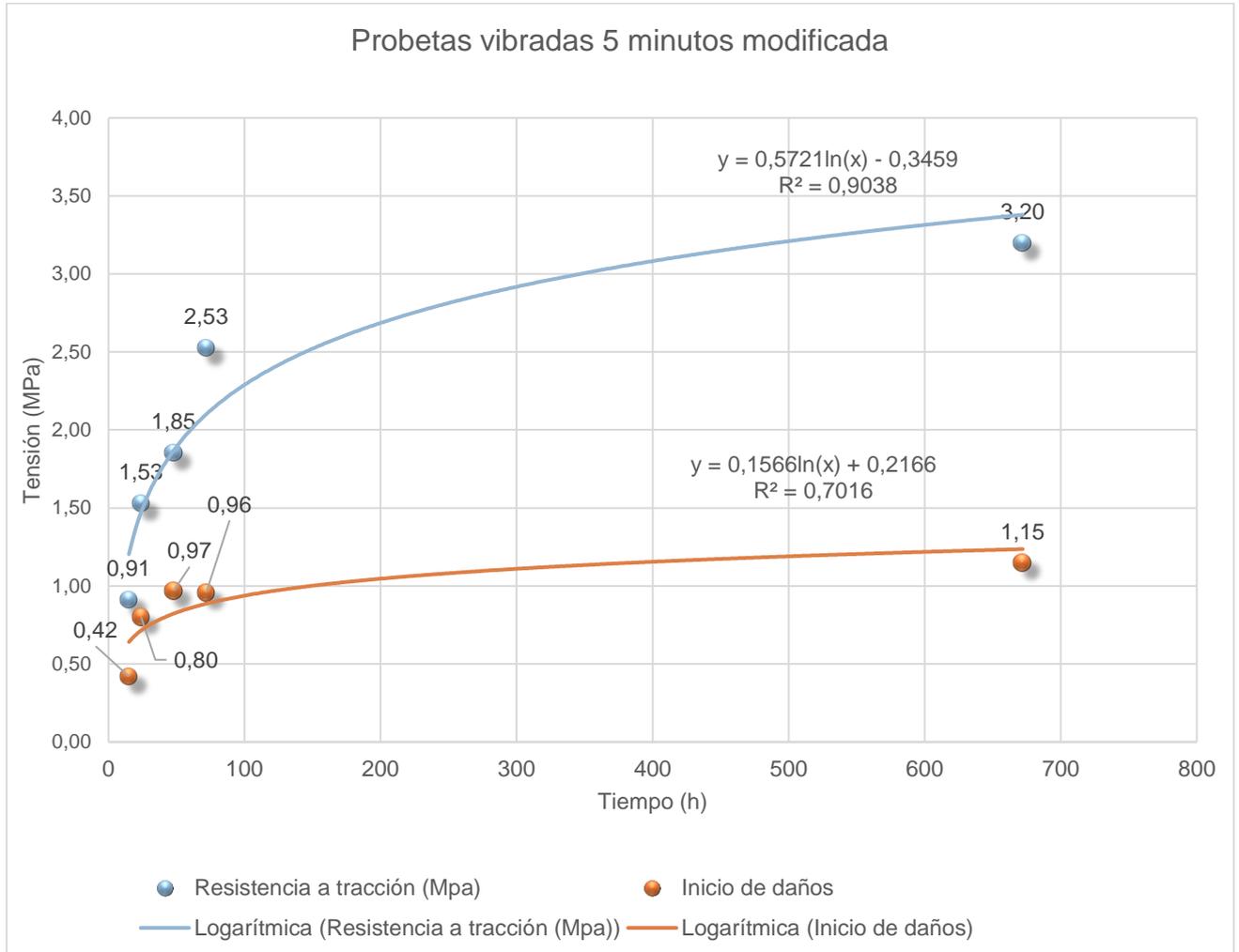
En este caso, al igual que en todos los anteriores, los días 8,10 y 14 muestran comportamiento anómalo que condicionan notablemente la tendencia de la resistencia a tracción soportada por la probeta. En el caso de la curva de inicio de daños, estos puntos anómalo vuelven a no ser tan notables. Para un análisis más correcto, se



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



eliminan los puntos anómalos y se representan dichas curvas como puede verse en la Gráfica 20.



GRÁFICA 20. PROBETAS VIBRADAS 5 MINUTOS MODIFICADA.

El ajuste ahora es mucho más preciso, para el caso de la resistencia a tracción con la nueva curva se alcanzaría una resistencia pasados 14 días de 2,98 MPa, punto muy cercano a la resistencia alcanzada a los 28 días (3,2 MPa). Y para el caso de la curva de inicio de daños, el valor de la resistencia a los 14 días es 1,12 MPa, valor que es prácticamente igual que la resistencia característica (1,15 MPa).

Un hecho importante es que se va comprobando como, a medida que aumenta la duración de la vibración, el inicio de los daños es más temprano. Visualmente este



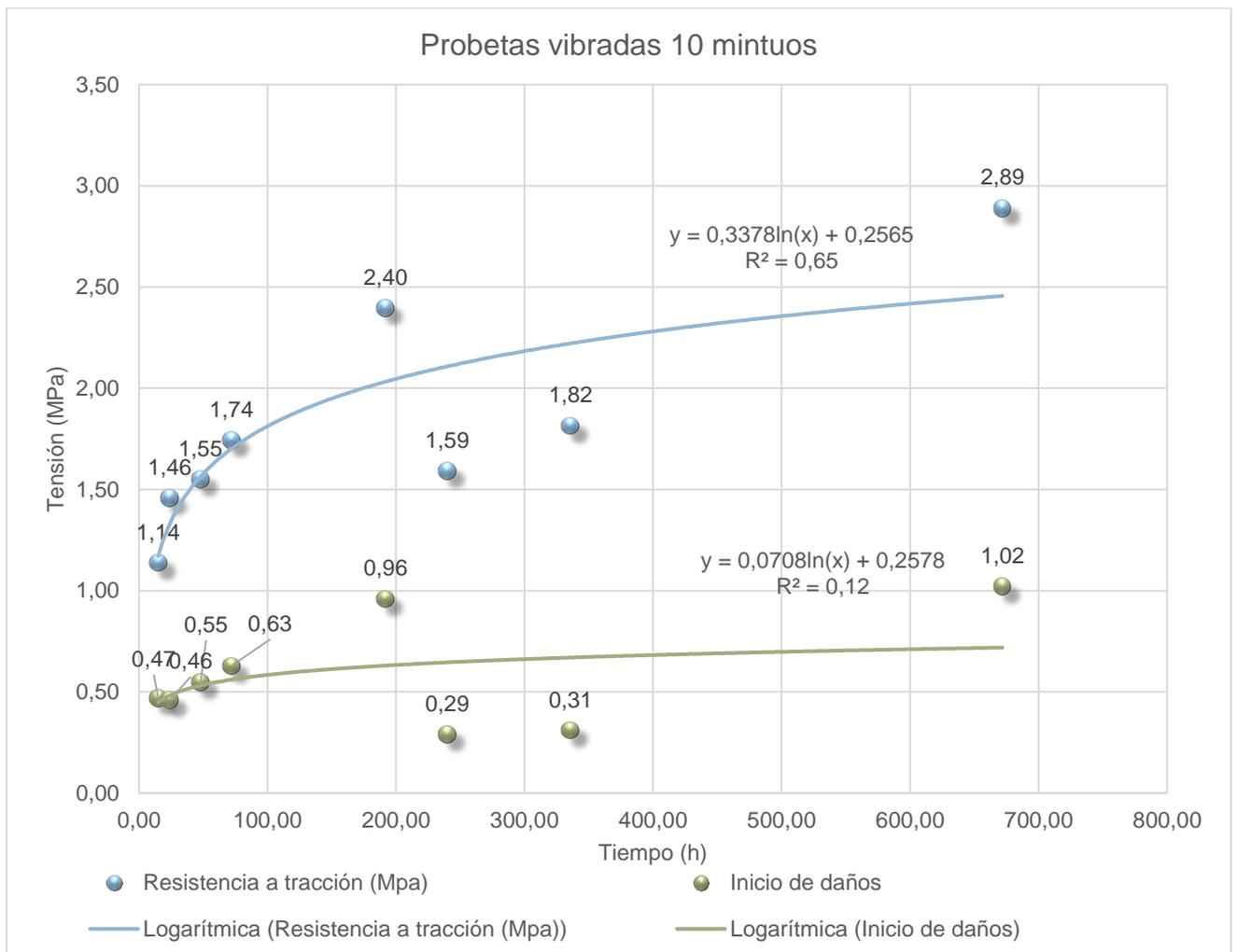
Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



fenómenos se comprueba porque las curvas azul (resistencia final) y naranja (inicio de daños) están cada vez más separadas.

Probetas vibradas durante 10 minutos

Se realizó de nuevo para las probetas vibradas durante 10 minutos la representación de las resistencias a tracción a lo largo del fraguado, y las tensiones a las cuales se iniciaban los daños determinadas con la herramienta de emisión acústica. Se representan dos curvas de tendencia logarítmica en la Gráfica 21 que se muestra a continuación.



GRÁFICA 21. PROBETAS VIBRADAS 10 MINUTOS.

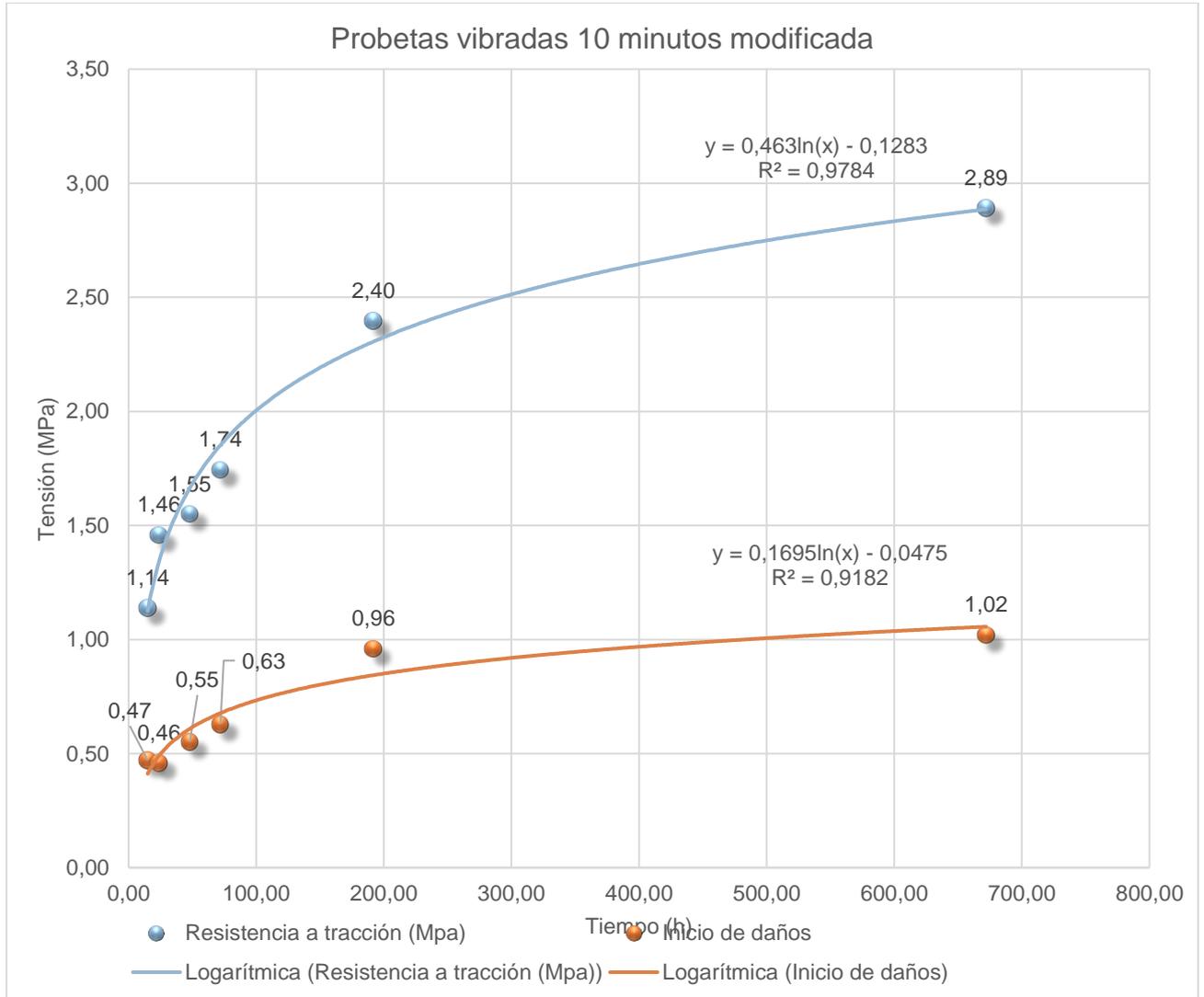
Para el caso de las probetas vibradas 10 minutos sigue manteniéndose la tendencia de los casos anteriores, las probetas ensayadas los días 10 y 14 muestran una tendencia



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



anómala. En este caso, aparentemente la probeta ensayada en día 8 no muestra un comportamiento anómalo. Se modifica la Gráfica 21 eliminando los puntos anómalos y se representa el nuevo resultado en la Gráfica 22.



GRÁFICA 22. PROBETAS VIBRADAS 10 MINUTOS MODIFICADA.

Puede verse, como la tendencia de las curvas ahora es mucho más ajustada. Pasados 14 días la resistencia que se espera obtener es 2,53 MPa, valor muy cercano a la resistencia característica de las probetas vibradas 10 minutos, que es 2,89 MPa. Y en el caso de la curva de inicio de datos, la resistencia tras 336 horas (14 días) sería de 0,93 MPa, valor prácticamente igual que el de la resistencia a los 28 días (1,02 MPa).

Para poder analizar desde otro punto de vista los datos anteriores, y poder obtener más conclusiones acerca de ellos, se ha decidido representar los datos de tal manera que



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



den información acerca de la influencia de la duración de las vibraciones con el paso del tiempo. Para ello, se ha representado el porcentaje que representa la resistencia de cada una de las probetas en el momento que empieza a sufrir daños respecto al valor total de la resistencia que aguantan.

Por ejemplo, para una de las probetas patrón (PATRÓN P1) en el ensayo realizado tras 15 horas de fraguado, la resistencia máxima es de 1,3 MPa y la inicio de daños 0,6 MPa, tomando la del patrón como el 100% el porcentaje al que aparecen los daños es el 49,1%. Con lo cual, para esa probeta no vibrada los daños aparecen al 49,1% de la carga máxima.

Realizando este mismo cálculo para todas las probetas, se ha llegado a los resultados que se muestran en la Tabla 12. En ella se muestra el porcentaje que la tensión de inicio de daños representa respecto a la tensión total que aguanta cada probeta.

TABLA 12. PORCENTAJES DE TENSIÓN EN EL INICIO DE DAÑOS RESPECTO A LA TENSIÓN DE ROTURA.

<i>% de la carga máxima</i>	<i>PATRÓN</i>	<i>Probetas vibradas 1 minuto</i>	<i>Probetas vibradas 5 minutos</i>	<i>Probetas vibradas 10 minutos</i>
<i>15 horas</i>	49,15%	46,53%	46,03%	41,32%
<i>24 horas</i>	78,40%	64,22%	52,28%	31,55%
<i>48 horas</i>	58,04%	44,84%	52,32%	35,47%
<i>72 horas</i>	67,04%	57,84%	38,05%	36,06%
<i>8 días</i>	57,54%	55,89%	47,14%	40,05%
<i>10 días</i>	79,05%	69,67%	38,20%	18,20%
<i>14 días</i>	64,73%	62,99%	38,60%	17,08%
<i>28 días</i>	73,75%	44,30%	35,93%	35,29%

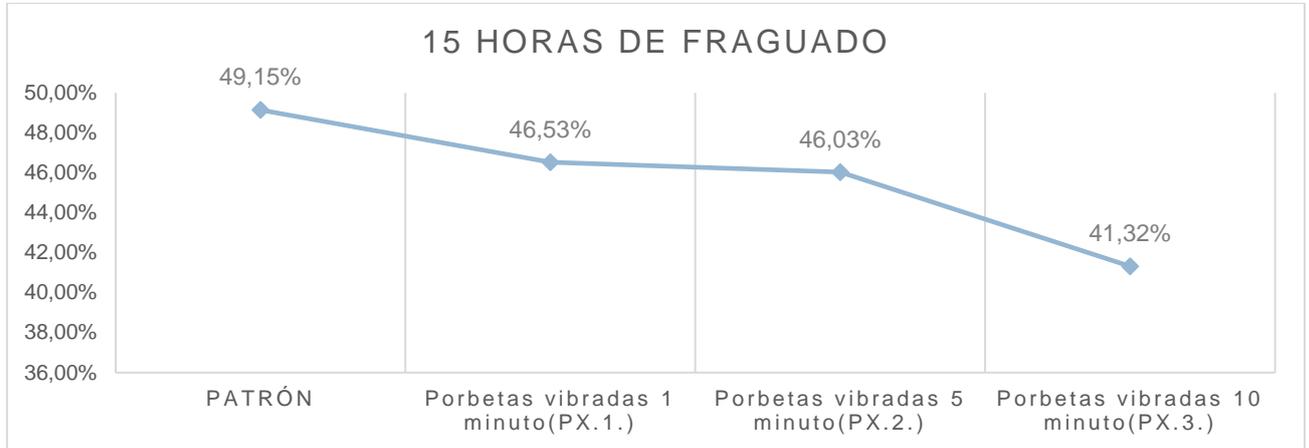
Analizando los datos de la Tabla 12, se han dividido los resultados en cuatro grupos, ya que dentro de cada grupo el comportamiento es similar, y entre los grupos el comportamiento del hormigón es diferente. Por tanto, se pueden diferenciar comportamientos diferentes en el hormigón dependiendo del tiempo de fraguado de la probeta y de la duración de las vibraciones.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



El primer grupo de resultados corresponde a las probetas que se ensayaron pasadas 15 horas de fraguado, se muestra en la Gráfica 23, el comportamiento de las probetas cuando estas eran sometidas a mayores tiempos de vibración.



GRÁFICA 23. PORCENTAJE DE LA TENSIÓN DE COMIENZO DE DAÑOS RESPECTO A LA TENSIÓN DE ROTURA.

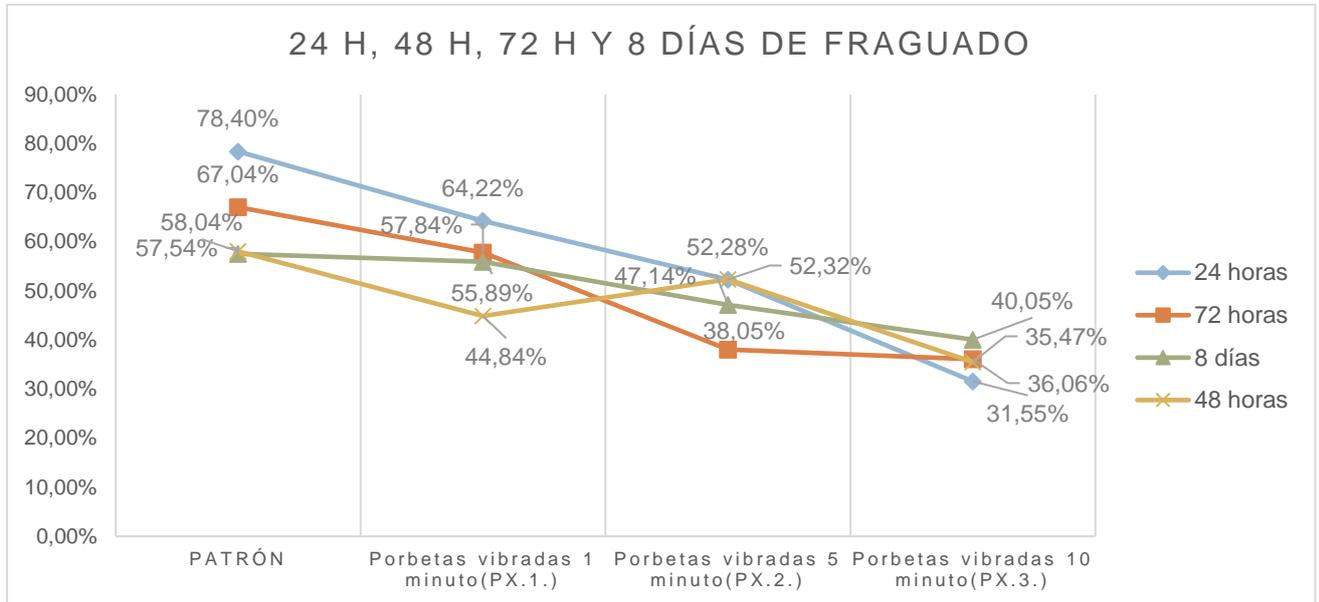
Como se puede comprobar, en el caso de las probetas ensayadas al cabo de 15 horas, el hecho de vibrarlas durante 1, 5 o 10 minutos no supone un cambio importante en la relación entre inicio de la rotura y resistencia máxima, aunque hay una tendencia descendente. De esta forma con vibraciones de 10 minutos se inicia el daño un 8 % antes que sin vibración. Esto supone que, al estar la muestra tan fresca, las vibraciones no generan daños importantes en la probeta.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



En segundo lugar, se representan las prometas ensayadas al cabo de 24 horas, 48 horas, 72 horas y 8 días en la Gráfica 24.



GRÁFICA 24. PORCENTAJE DE LA TENSIÓN DE COMIENZO DE DAÑOS RESPECTO A LA TENSIÓN DE ROTURA.

En el caso de estos ensayos, el descenso del porcentaje es más pronunciado que en el caso de las 15 horas, aunque sigue una pendiente poco pronunciada, puede ya comprobarse, como cuanto más vibrada está una probeta la tensión a la que empieza a sufrir microfisuras es menor. Por lo tanto, aparecen daños antes.

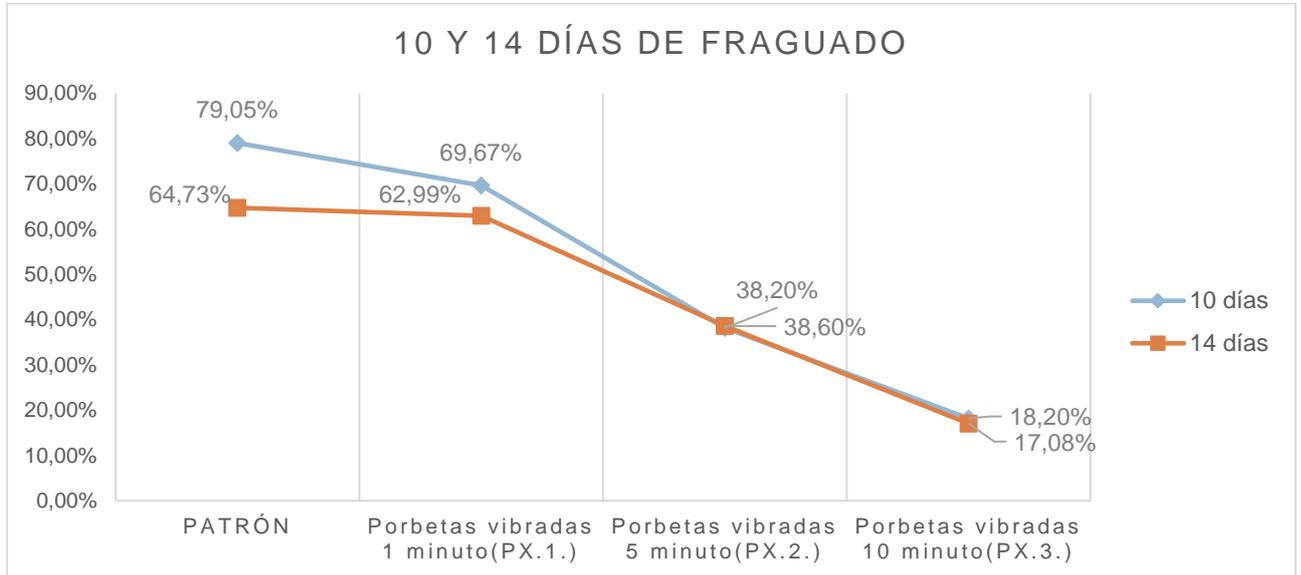
En este grupo, se ha incluido los ensayos realizados tras 48 horas, se puede ver como al vibrar un minuto el porcentaje disminuye notablemente. Esto se debe tomar como una anomalía dentro del ensayo, que no se debe tener en cuenta.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



En tercer lugar, en la Gráfica 25 se representan las probetas ensayadas tras 10 y 14 días de fraguado.



GRÁFICA 25. PORCENTAJE DE LA TENSIÓN DE COMIENZO DE DAÑOS RESPECTO A LA TENSIÓN DE ROTURA.

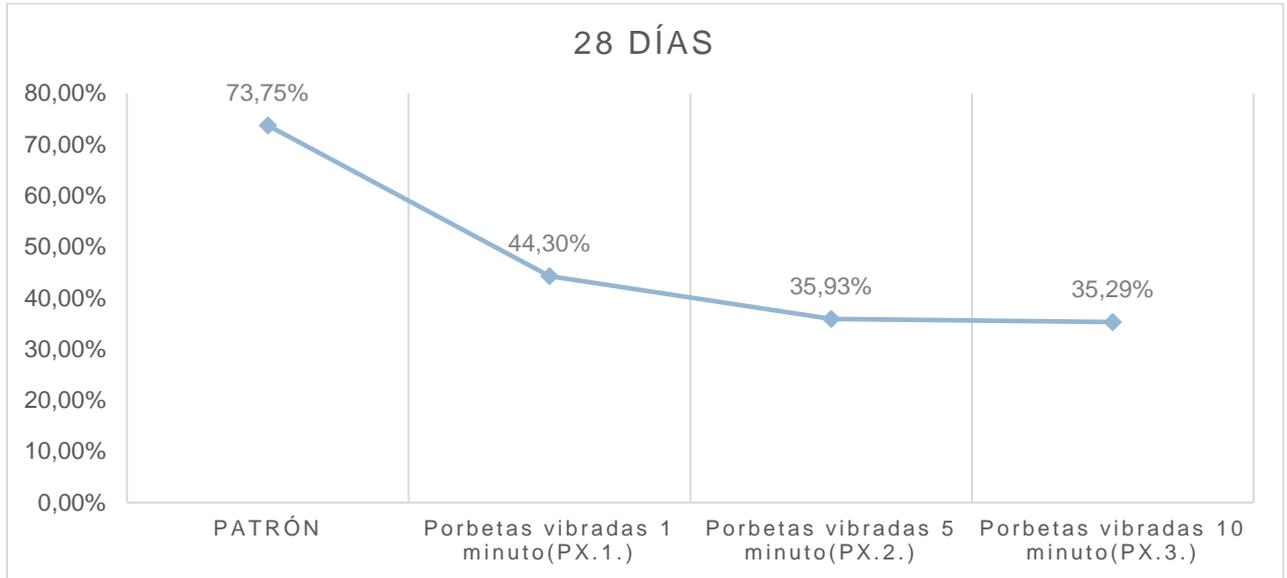
En este grupo se puede ver cómo el descenso del porcentaje es mucho más pronunciado que en los demás casos. No se debe olvidar, que como se ha determinado en el análisis anterior en el que se estudiaba el avance de la resistencia, estas probetas mostraban un comportamiento anómalo, con lo cual, puede que el descenso tan brusco del porcentaje esté condicionado por la anomalía y no por el propio comportamiento del material.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



Se ha incluido, como último grupo en la Gráfica 26 el comportamiento en las probetas vibradas tras 28 días.



GRÁFICA 26. PORCENTAJE DE LA TENSIÓN DE INICIO DE DAÑOS RESPECTO A LA TENSIÓN DE ROTURA.

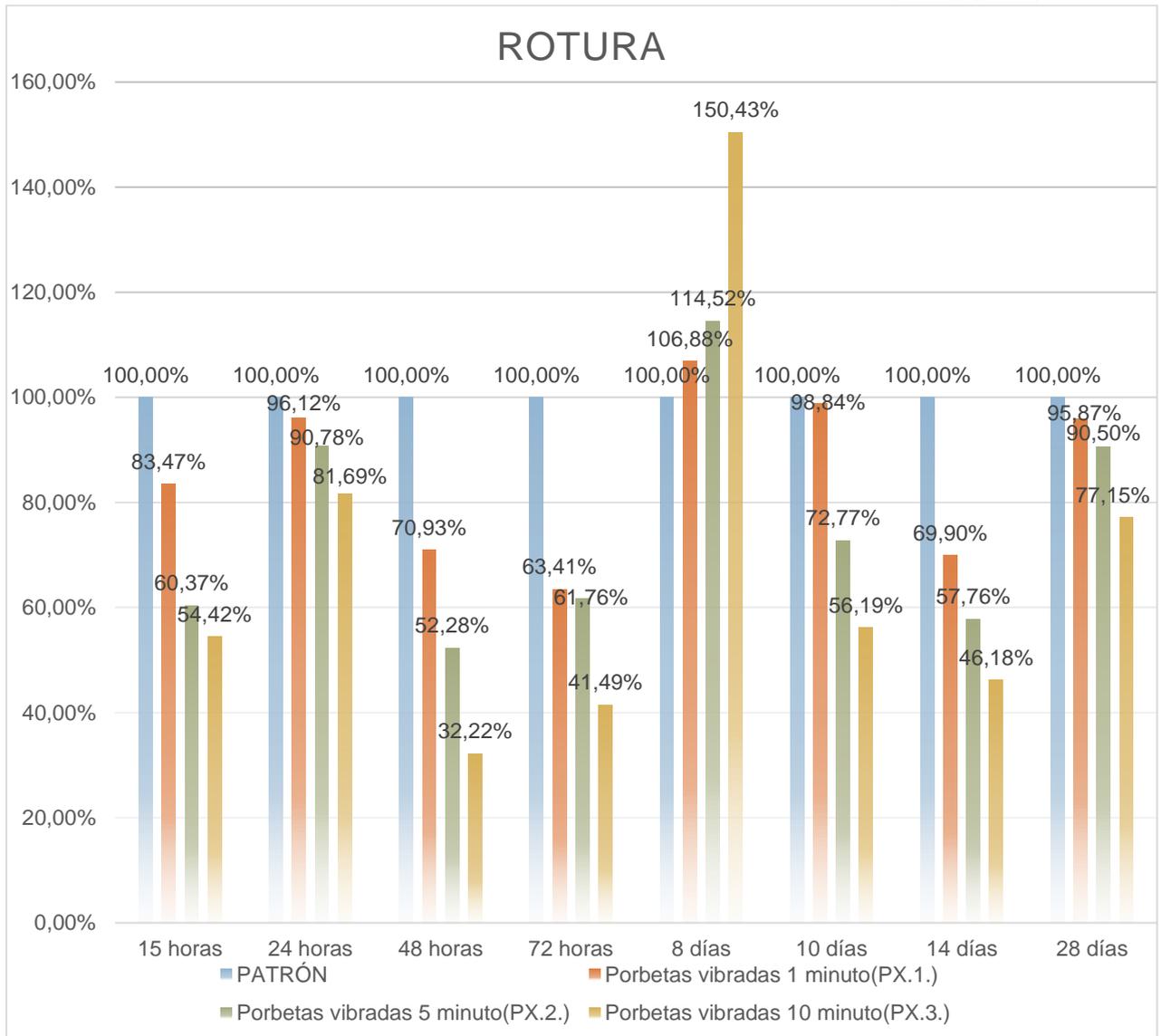
Se puede comprobar que en este caso el descenso del porcentaje al que se inician los daños es algo menos pronunciado variando del 73 % para el material sin vibrar al 35 % del material vibrado durante 10 minutos. Este comportamiento se asemeja al del grupo 2.

Del análisis de todas las probetas de manera general, se llega a la conclusión de que cuanto más tiempo de fraguado haya pasado, y a más tiempo este sometido el material a vibraciones, los daños aparecen antes.

Siguiendo con el análisis y la presentación de datos, se ha representado los datos de los ensayos de una manera diferente. En este caso, se toma que la resistencia que aguantan cada uno de los patrones es la máxima, y por tanto es del 100% para cada día, entonces, calculando el porcentaje al que rompe la probeta respecto al total con las diferentes vibraciones aplicadas se obtiene la Gráfica 27.



Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



GRÁFICA 27. COMPORTAMIENTO EN PORCENTAJE DE LA TENSIÓN DE ROTURA EN LAS PROBETAS.

Se puede ver en el gráfico como durante todos los días en los que se realizaban ensayos cuanto más tiempo estaban las probetas sometidas a vibración el porcentaje de carga que aguantaban hasta la rotura es menor.

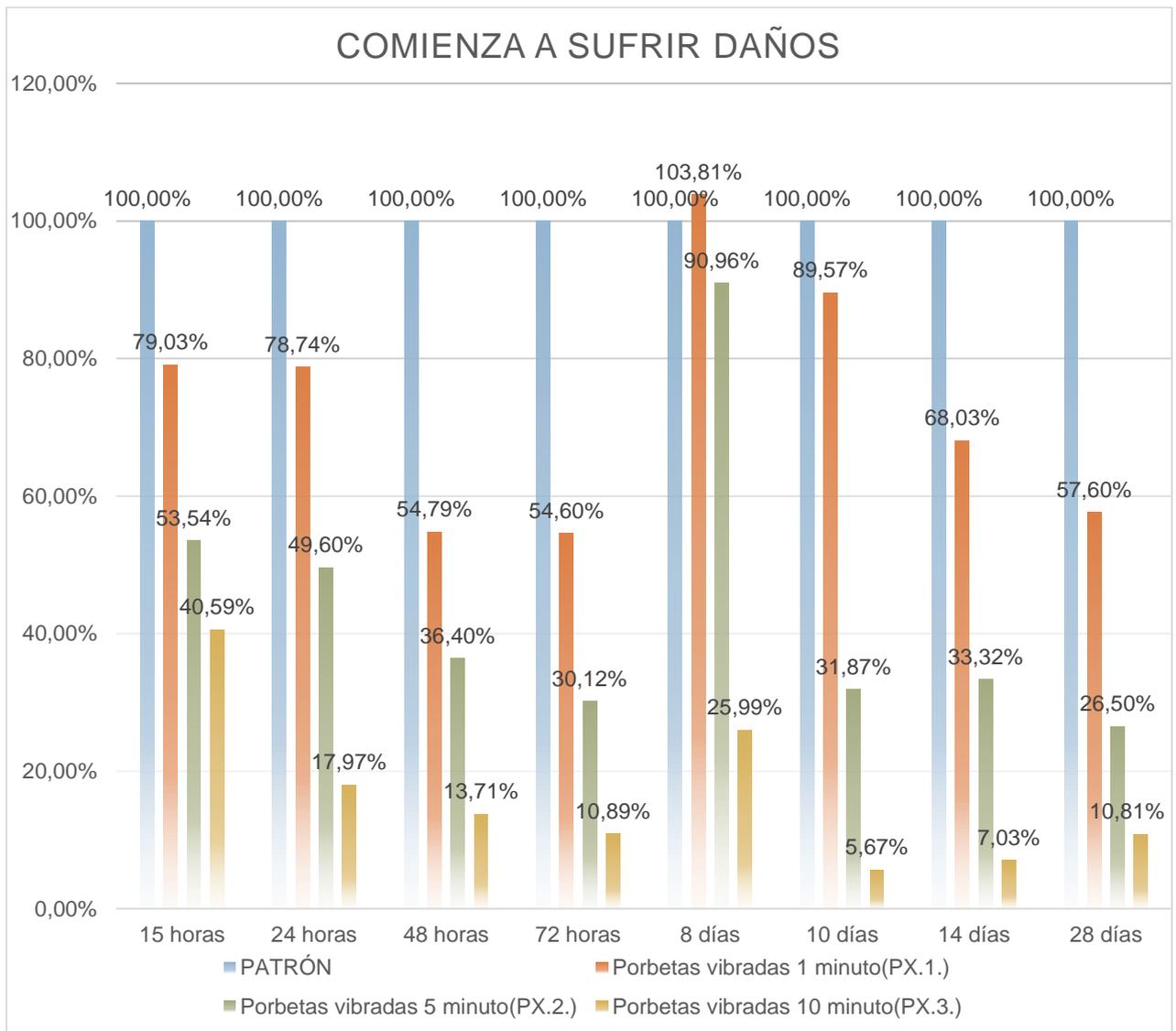


Efecto de las vibraciones originadas por voladuras sobre materiales estructurales y de sostenimiento.



Además, este gráfico muestra una anomalía en el día ocho. Esta anomalía puede estar debida a que la probeta del día 8 resultó ser anómala en unos casos si y en otros no (a diferencia de la de los días 10 y 14 que siempre resultaron anómalas).

Atendiendo al gráfico correspondiente al momento en el que las probetas empiezan a sufrir daños. Las probetas comienzan a sufrir daños importantes cuando estas han sido sometidas a una vibración mayor, se puede ver en la Gráfica 28.



GRÁFICA 28. COMPORTAMIENTO EN PORCENTAJE DE LA TENSIÓN A LA QUE COMIENZAN A SUFRIR LAS PROBETAS.

Al igual que en el caso de la rotura, tras 8 días existe una anomalía en el punto correspondiente a la probeta vibrada 1 minuto, sin embargo, en general, puede verse



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



como las probetas más curadas y vibradas durante más tiempo rompen a un porcentaje mucho menor respecto al patrón.



7. CONCLUSIONES

El trabajo de laboratorio realizado durante los últimos meses en el cual se realizaron ensayos de tracción indirecta y de compresión a probetas de hormigón proyectado con acelerante en su dosificación ha permitido determinar y caracterizar el comportamiento de la gunita cuando esta es sometida a diferentes tiempos de vibración en diferentes momentos de su fraguado.

- Se han preparado 40 probetas (32 de tracción y 8 de compresión) para determinar la evolución de la resistencia a compresión simple y a tracción indirecta con el tiempo de fraguado, así como para determinar la influencia del tiempo total de vibración en dicha resistencia.
- Para ello se ha diseñado una campaña experimental definiendo los materiales, equipos de laboratorio y parámetros de ensayo (tiempos de fraguado, intensidad de vibración y duración de la vibración). Este diseño se ha basado en una serie de ensayos previos preliminares, que sirvieron para acotar dichos parámetros y concretar el modo de operación.
- Se ha determinado cual es la resistencia a compresión simple y a tracción indirecta de un hormigón que posee acelerante en su dosificación en los días más relevantes a lo largo de su curado, desde las 15 horas hasta los 28 días.
- Se ha probado la utilidad de la emisión acústica para determinar daños en el interior de las probetas. Con esta herramienta no solo se ha determinado la existencia de los daños, sino que se ha podido comprobar que el aumento de la actividad de emisión acústica permite definir el punto en la gráfica de tensión-tiempo en el que la probeta comienza a sufrir daños importantes.
- Aumentar el tiempo de vibración supone disminuir la resistencia final del material y la carga a la que se inician los daños. Aunque la influencia de las vibraciones depende de la edad del hormigón, a grandes rasgos se aprecia que:
 - La influencia de las vibraciones sobre la resistencia del material es mayor en edades tempranas que al acercarse al fraguado completo. Por ejemplo, tras 10 minutos de vibración la resistencia puede bajar al 32% si el hormigón tiene 48 horas y al 77 % si tiene ya 28 días.
 - En el caso de la carga a la que se inician los daños, el efecto es el opuesto, siendo menor la influencia en edades pequeñas (baja hasta el 40% de la resistencia) que en las grandes (los daños aparecen al 7% de la resistencia).



**Efecto de las vibraciones originadas
por voladuras sobre materiales
estructurales y de sostenimiento.**



Como conclusión personal debo comentar, que durante el periodo en el que he formado parte del departamento de Explotación y Prospección de Minas para realizar este TFM, he aprendido a trabajar con equipos que anteriormente nunca había tenido la oportunidad de trabajar, y lo que es más importante, he perdido el miedo a aprender y a utilizar equipos y herramientas totalmente nuevas para mí. Además, he mejorado mi pensamiento crítico y aumentado mi iniciativa a la hora de tomar decisiones dentro de un proyecto.



8. BIBLIOGRAFÍA

Anders Ansell, 2004. In situ testing of young shotcrete subjected to vibrations from blasting.

F. Kishinoue, 1990. An experiment on the progression of fracture (a preliminary report). Jisin 6:24–31 (1934) translated and published by Ono K, J. AE 9 (3) (1990).

Ficha técnica de la célula de carga de 5 kN, modelo TCEamp.

Ficha técnica de la célula de carga modelo CONTROLS C1115.

Ficha técnica de la tarjeta COMET, DATA LOGGER

Ficha técnica del acelerómetro KS813B.

Ficha técnica del sensor de desplazamiento LAB PM 55.

Ficha técnica del sensor de emisión acústica R3α.

Ficha técnica DEWE43.

J. Xu, 2008. Nondestructive Evaluation of Prestressed Concrete Structures by Means of Acoustic Emissions Monitoring (Ph.D. thesis), Auburn University.

M. Ohtsu, H. Watanabe, 2001. Quantitative damage estimation of concrete by acoustic emission, Constr. Build. Mater. 15 (5–6)

M.N. Noorsuhada, 2016. An overview on fatigue damage assessment of reinforced concrete structures with the aid of acoustic emission technique.

Manual de la tarjeta de adquisición Micho-SHM.

Noorsuhada Md Nor, Azmi Ibrahim, Noruzura Muhamad Bunnori, Hamidah Mohd Saman, 2013. Acoustic emission signal for fatigue crack classification on reinforced concrete beam.

Norma UNE 103-300-93

Norma UNE 22/950-90

P. Mazal, F. Vlastic, V. Koula, 2015. Use of acoustic emission method for identification of fatigue micro-cracks creation.

S.I.K.A. (2009) Sistemas de Aplicación de productos Sika en el hormigón proyectado.

Takeshi Watanabe, Motoyasu Hoomi, Kunihiro Yuno, Chikanori Hashimoto, 2010. Quality evaluation of shotcrete by acoustic emission.