

# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

PROYECTO FIN DE GRADO

**TÍTULO:** Puesta a punto de la metodología de ensayo para una campaña experimental sobre probetas de piedra calcarenítica.

**Autor:** Marta Cruces Correa

**Tutor:** Felipe García Sánchez

**Departamento:** Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

**Área de conocimiento:** Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

**Cotutor:** Germán Castillo López

**Departamento:** Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

**Área de conocimiento:** Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Málaga, 2016







## Resumen

---

La cuestión que se pretende resolver con la realización de este proyecto es la de esclarecer el valor que pueda tener, cara a subsiguientes procesos, la puesta a punto de una tanda de ensayos específicos para determinar la variación en el comportamiento mecánico ante diferentes grados de humedad tras procesos de consolidación de la piedra calcarenítica utilizada en edificación histórica en la comunidad autónoma de Andalucía.

El Proyecto Fin de Grado nace como resultado de la propuesta de investigación establecida por la tesis doctoral en desarrollo que realiza D. Juan Ramón Baeza Álvarez, profesor asociado del área de conocimiento de Construcciones Arquitectónicas, gestionada por el Departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Sevilla, cuya finalidad es la identificación de las propiedades mecánicas de la piedra del Cerro de San Cristóbal y su degeneración debido a los cambios de humedad en dicha piedra y que, por su naturaleza, necesita la realización de ensayos específicos.

## Palabras clave

---

caracterización mecánica de piedras, mineral calcarenítico, Cerro de San Cristóbal, frecuencia de resonancia fundamental, resistencia a compresión.



## Abstract

---

This project is intended to be a try for clarify the question about the possible value for subsequent processes, of a correct set up of a batch of specific tests to determine the variation in the mechanical behavior at different humidities after consolidation processes calcarenitic stone used in buildings which are part of historic heritage of the Autonomous Community of Andalusia..

This Final Year Project is born as the result of a research proposal issued from a currently running PhD thesis, authored by D. Juan Ramón Baeza Álvarez, associate professor from the area of knowledge of Architectural, of the Department of Architectural Technology II of the Technical High School for Building Engineering, University of Seville. This PhD thesis is intended to identify the basic mechanical properties of the stone extracted from Cerro de San Cristóbal and its degenerative behaviour due to changes in humidity needing, because its nature, specific tests.

## Keywords

---

stone's mechanical characterization, calcareous sandstone mineral, Cerro de San Cristobal, fundamental resonance frequency, compressive strength.



## Tabla de contenidos

1	Introducción.....	1
1.1	Justificación de la investigación.....	1
1.2	Problema de la investigación.....	1
1.3	Metodología.....	2
1.4	Tratamiento de los resultados de la investigación.....	2
1.5	Definiciones.....	2
1.6	Límites de la investigación: alcance y supuestos previos.....	3
1.7	Conclusión.....	3
2	Contextualización de la investigación de caracterización mecánica en elementos pétreos.....	5
2.1	Relación pormenorizada de estudios recientes.....	5
2.2	Marco teórico de la metodología empleada.....	6
2.2.1	Ensayo estático.....	6
2.2.2	Ensayo dinámico.....	8
3	Metodología de la investigación.....	11
3.1	Justificación de la metodología.....	11
3.1.1	Ensayo estático.....	11
3.1.2	Ensayo dinámico.....	12
3.2	Descripción de los procesos metodológicos.....	12
3.2.1	Preparación previa.....	13
3.2.2	Ensayo dinámico.....	18
3.2.3	Ensayo estático.....	22
4	Análisis de los datos.....	31
4.1	Relación detallada de los resultados de los ensayos.....	31
4.1.1	Probeta IA.....	31
4.1.2	Probeta IB.....	34
4.1.3	Probeta IIA.....	39
4.1.4	Probeta IIB.....	43
4.1.5	Probeta IIIA.....	47
4.1.6	Probeta IIIB.....	52
4.2	Análisis de resultados.....	57
5	Conclusión e implicaciones.....	63

5.1	Conclusiones .....	63
5.1.1	Análisis comparativo de las diferentes tecnologías empleadas.....	63
5.1.2	Conclusiones extraídas del análisis de resultados .....	64
5.2	Implicaciones .....	65
5.3	Limitaciones.....	65
5.4	Consecuencias de la investigación.....	66
6	Bibliografía .....	67
7	Anexos .....	71
7.1	Códigos de ejecución de las piezas en la máquina de control numérico .....	71
7.1.1	Piezas 1 y 2.....	71
7.1.2	Piezas 3 y 4.....	79
7.2	Planos de extensómetro .....	81

## Lista de tablas

Tabla 1. Relación de material adicional adquirido para el conjunto extensómetro .....	16
Tabla 2. PROBETA IA. Ensayo dinámico longitudinal. ....	31
Tabla 3. PROBETA IA. Ensayo dinámico transversal. ....	32
Tabla 4. PROBETA IA. Densidad aparente para las dimensiones originales y tras ser retocas.....	34
Tabla 5. PROBETA IB. Ensayo dinámico longitudinal. ....	35
Tabla 6. PROBETA IB. Ensayo dinámico transversal. ....	35
Tabla 7. PROBETA IB. Densidad aparente para las dimensiones originales y tras ser retocadas.....	38
Tabla 8. PROBETA IIA. Ensayo dinámico longitudinal. ....	39
Tabla 9. PROBETA IIA. Ensayo dinámico transversal. ....	40
Tabla 10. PROBETA IIA. Densidad aparente para las dimensiones originales y tras ser retocada. ....	42
Tabla 11. PROBETA IIB. Ensayo dinámico longitudinal. ....	43
Tabla 12. PROBETA IIB. Ensayo dinámico transversal. ....	43
Tabla 13. PROBETA IIB. Densidad aparente para las dimensiones originales y tras ser retocada. ....	46
Tabla 14. PROBETA IIIA. Ensayo dinámico longitudinal. ....	47
Tabla 15. PROBETA IIIA. Ensayo dinámico transversal. ....	48
Tabla 16. PROBETA IIIA. Densidad aparente para las dimensiones originales y tras ser retocada. ....	51
Tabla 17. PROBETA IIIB. Ensayo dinámico longitudinal. ....	53
Tabla 18. PROBETA IIIB. Ensayo dinámico transversal. ....	53
Tabla 19. PROBETA IIIB. Densidad aparente para las dimensiones originales y tras ser retocada. ....	56
Tabla 20. Tabla resumen de resultados obtenidos con comparativa a resultados de estudios previos.	57



## Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Circuito representativo cuarto de puente de Wheatstone .....	7
Ilustración 2. Esquema interno de LVDT .....	7
Ilustración 3. Disposición de probeta para ensayo longitudinal.....	9
Ilustración 4. Propagación de la honda en ensayo dinámico longitudinal.....	9
Ilustración 5. Disposición de probeta para ensayo transversal. ....	9
Ilustración 6. Propagación de la honda en ensayo dinámico transversal.....	9
Ilustración 7. Dispositivos existentes en el mercado tomados como referencia para la fabricación del extensómetro.....	13
Ilustración 8. Pieza 1 del conjunto extensómetro.....	14
Ilustración 9. Pieza 2 del conjunto extensómetro.....	14
Ilustración 10. Piezas 3 y 4 del conjunto extensómetro. ....	15
Ilustración 11. Pieza 5 del conjunto extensómetro.....	15
Ilustración 12. Anillos superior (izquierda) e intermedio (derecha) del conjunto extensómetro.....	15
Ilustración 13. Pieza 2, anillo inferior.....	16
Ilustración 14. Prueba de funcionamiento.....	17
Ilustración 15. "Emodumeter".....	19
Ilustración 16. Bancada de equipo de ensayo dinámico.....	19
Ilustración 17. Acelerómetro de equipo de ensayo dinámico.....	19
Ilustración 18. Bolas de acero reforzado de equipo de ensayo dinámico.....	19
Ilustración 19. Campana desecadora acondicionada.....	20
Ilustración 20. Pesado de probeta con doble balanza.....	20
Ilustración 21. Esquema de posicionamiento de probeta para obtención del módulo de elasticidad longitudinal en ensayo dinámico. ....	21
Ilustración 22. Disposición de probeta para obtención de módulo de elasticidad longitudinal en ensayo dinámico. ....	21

Ilustración 23. Esquema de posicionamiento de probeta para ensayo dinámico transversal. ....	21
Ilustración 24. Disposición de probeta para ensayo dinámico transversal. ....	21
Ilustración 25. Galga extensométrica. ....	23
Ilustración 26. Terminales de conexión auxiliares. ....	23
Ilustración 27. Galga extensométrica pegada sobre probeta. ....	23
Ilustración 28. Módulo NI 9212. ....	24
Ilustración 29. Chasis NI cDAQ-9174. ....	24
Ilustración 30. Esquemático de LVDT longitudinal. ....	26
Ilustración 31. Esquema de conexiones para el equipo de captación. ....	26
Ilustración 32. Extensómetro montado sobre probeta. ....	27
Ilustración 33. Disposición de puesto de trabajo para tandas de ensayo estático. ....	28
Ilustración 34. PROBETA IA. Módulo de elasticidad longitudinal con LVDT. ....	33
Ilustración 35. PROBETA IA. Coeficiente de Poisson con LVDT. ....	33
Ilustración 36. Rotura de probeta IA. ....	34
Ilustración 37. PROBETA IB. Gráfica comparativa entre deformación obtenida con LVDT y con galga. ....	36
Ilustración 38. PROBETA IB. Módulo de elasticidad obtenido con LVDT. ....	37
Ilustración 39. PROBETA IB. Módulo de elasticidad obtenido con galgas. ....	37
Ilustración 40. PROBETA IB. Coeficiente de Poisson obtenido mediante LVDT. ....	38
Ilustración 41. PROBETA IB. Coeficiente de Poisson medido mediante galgas. ....	38
Ilustración 42. Rotura de probeta IB. ....	39
Ilustración 43. PROBETA IIA. Gráfica comparativa entre deformación medida con LVDT y con galga. ....	41
Ilustración 44. PROBETA IIA. Módulo de elasticidad longitudinal medido mediante LVDT. ....	41
Ilustración 45. PROBETA IIA. Módulo de elasticidad longitudinal medido mediante galga. ....	42
Ilustración 46. Rotura de probeta IIA. ....	42
Ilustración 47. PROBETA IIB. Gráfica comparativa entre deformación medida con LVDT y con galga. ....	44

Ilustración 48. PROBETA IIB. Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante LVDT.....	45
Ilustración 49. PROBETA IIB. Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante galga. ....	45
Ilustración 50. PROBETA IIB. Coeficiente de Poisson obtenido mediante LVDT.....	46
Ilustración 51. PROBETA IIB. Coeficiente de Poisson obtenido mediante galga. ....	46
Ilustración 52. Rotura de la probeta IIB.....	47
Ilustración 53. PROBETA IIIA. Gráfica comparativa entre deformación obtenida con LVDT y con galga. .....	49
Ilustración 54. PROBETA IIIA. Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante LVDT.....	50
Ilustración 55. PROBETA IIIA. Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante galga. ....	50
Ilustración 56. PROBETA IIIA. Coeficiente de Poisson obtenido mediante LVDT.....	51
Ilustración 57. PROBETA IIIA. Coeficiente de Poisson obtenido mediante galga. ....	51
Ilustración 58. Rotura de probeta IIIA.....	52
Ilustración 59. PROBETA IIIB. Gráfica comparativa entre deformación obtenida con LVDT y galga. ...	54
Ilustración 60. PROBETA IIIB. Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante LVDT.....	55
Ilustración 61. PROBETA IIIB. Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante galga. ....	55
Ilustración 62. PROBETA IIIB. Coeficiente de Poisson obtenido mediante LVDT.....	56
Ilustración 63. PROBETA IIIB. Coeficiente de Poisson obtenido mediante galga. ....	56
Ilustración 64. Rotura de probeta IIIB.....	57
Ilustración 65. Módulo de elasticidad longitudinal - Gráfico comparativo.....	58
Ilustración 66. Módulo de elasticidad transversal - Gráfico ilustrativo.....	59
Ilustración 67. Coeficiente de Poisson - Gráfico comparativo.....	59
Ilustración 68. Carga de rotura - Gráfico ilustrativo.....	60
Ilustración 69. Densidad aparente - Gráfico comparativo. ....	60



## Notaciones

E	Módulo de elasticidad.
$\sigma$	Tensión aplicada.
$\varepsilon$	Deformación unitaria.
M	Métrica. (Ejemplo: M6 métrica seis).
°C	Grados Celsius.
Ln()	Logaritmo neperiano.
$E_d$	Módulo de elasticidad dinámico longitudinal.
$E_{e \text{ LVDT}}$	Módulo de elasticidad estático con LVDT.
$E_{e \text{ galga}}$	Módulo de elasticidad estático con galgas.
$G_d$	Módulo de elasticidad dinámico transversal.
$\nu_{\text{LVDT}}$	Coefficiente de Poisson con LVDT.
$\nu_{\text{galga}}$	Coefficiente de Poisson con galgas.
$\sigma_{\text{rot}}$	Carga de rotura.
$\gamma_{\text{ap d}}$	Densidad aparente con parámetros de ensayo dinámico.
$\gamma_{\text{ap e}}$	Densidad aparente con parámetros de ensayo estático.
$\bar{X}_Y$	Media de los diferentes valores de Y.



## Lista de acrónimos y abreviaturas

PFG	Proyecto fin de grado.
LVDT	Transformador diferencial de variación lineal ( <i>Linear variable differential transformer</i> ).
m	Metro.
mm	Milímetro.
$\mu\text{m}$	Micrómetro.
g	Gramo.
Kg	Kilogramo.
t	Tonelada.
CNC	Máquina de Control Numérico por Computador.
Coef.	Coeficiente.
Desv.	Desviación.
GPa	Gigapascal.
MPa	Megapascal.
Hz	Hercio.
kHz	Kilohercio.
min	Minuto.
s	Segundo.
V	Voltio.
mV	Milivoltio.
V rms	Voltios valor cuadrático medio.



## Agradecimientos

---

Quisiera hacer uso de estas líneas para expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que han colaborado en la realización de este Proyecto Fin de Grado; en especial al Dr. D. Felipe García Sánchez y al Dr. D. Germán Castillo López por su excelente labor como tutores, que ha servido para fomentar mi desarrollo académico e impulsar mi espíritu científico.

Mis agradecimientos, asimismo, al Técnico de Grado Medio de Apoyo a la Docencia e Investigación D. Manuel José Herrera Fernández y a D. José Bernardo Beltrán Ramos por su excelente trabajo y su ayuda. Gracias al apoyo de ambos fue posible la fabricación del utillaje que he diseñado para el desarrollo de este proyecto.



# 1 Introducción

## 1.1 Justificación de la investigación

La elección por parte de la autora de este tema para su Proyecto de Fin de Grado (en adelante PFG) ha sido motivada por el carácter experimental del mismo, con implicaciones en el campo del diseño de piezas auxiliares para procesos de pruebas, y porque entre el abanico de posibilidades que le fueron ofrecidas por el Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación ésta podría proporcionarle un alto nivel de desarrollo académico y de superación personal, brindándole la posibilidad de transformar ideas en herramientas de trabajo que sirvan como cimientos para establecer las bases de futuras líneas de investigación mediante el ensayo de la piedra natural y la posibilidad de apoyar a la conservación de nuestro patrimonio histórico y cultural.

## 1.2 Problema de la investigación

La cuestión que se resuelve con la realización de este proyecto es la de esclarecer el valor que pueda tener, cara a subsiguientes procesos, la puesta a punto de una tanda de ensayos específicos para determinar la variación en el comportamiento mecánico ante diferentes grados de humedad tras procesos de consolidación de la piedra calcarenítica utilizada en edificación histórica en la comunidad autónoma de Andalucía.

PFG se crea como resultado de la propuesta de investigación establecida por la tesis doctoral en desarrollo que realiza D. Juan Ramón Baeza Álvarez, profesor asociado del área de conocimiento de Construcciones Arquitectónicas gestionada por el departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Sevilla, cuya finalidad es la identificación de las propiedades mecánicas de la piedra del Cerro de San Cristóbal y su degeneración debido a los cambios de humedad en dicha piedra y que, por su naturaleza, necesita la realización de ensayos específicos. Sobre la preparación y ajuste de los mismos se centra el objeto del presente proyecto.

La contribución que se consigue aportar refleja la clara necesidad de perfilamiento previo a una tanda de ensayos experimentales con el fin de optimizar un proceso que exige extremo rigor instrumental y técnico debido a la fragilidad e irregularidad del material que se desea conocer, marcando las pautas, obteniendo impresiones previas del elemento de ensayo y fabricando el necesario utillaje específico.

### 1.3 Metodología

Sobre cada una de las probetas se realiza una tanda de ensayos, tanto destructivos como no destructivos, de los que se extrae un conjunto de datos que posteriormente son tratados para obtener tres módulos de elasticidad por cada probeta. Los resultados de los test son estudiados y contrastados entre sí.

Se diseña y fabrica un extensómetro específico, capaz de medir el alargamiento longitudinal y transversal mediante la utilización de transformadores diferenciales para la variación longitudinal (en adelante LVDT).

### 1.4 Tratamiento de los resultados de la investigación

Para alcanzar el objetivo de la investigación se tratan los datos obtenidos a través del ensayo estático valiéndose de una hoja de cálculo para poder realizar la comparativa con los datos arrojados por el ensayo dinámico.

Las cifras obtenidas a partir del ensayo estático, realizado tanto con LVDT como con galgas, se recogen por dos vías: el programa *SignalExpress* y el programa de captación de datos de la máquina de ensayo de compresión de SERVOSIS. Ambos conjuntos son tratados y relacionados para obtener el módulo de elasticidad de cada probeta.

Las cantidades proporcionadas por el ensayo dinámico son directamente las necesarias para realizar el análisis teórico y el consecuente estudio comparativo entre los datos obtenidos mediante ensayo destructivo.

### 1.5 Definiciones

En el contexto de la investigación la palabra *probeta* hace referencia a un cilindro de piedra calcarenítica procedente de la cantera de San Cristóbal en el Puerto de Santa María (Cádiz) que, al parecer, proporcionó la piedra necesaria para la construcción de diversos edificios históricos inscritos en los listados de patrimonio cultural protegido por la legislación de la Comunidad Autónoma de Andalucía.

El acrónimo *LVDT* hace referencia a un dispositivo electrónico capaz de medir microdesplazamientos lineales, utilizado para determinar el alargamiento o acortamiento de una probeta tanto en el eje *X* como en el eje *Y*.

El término *extensómetro* se refiere al dispositivo que sustenta los diferentes LVDT utilizados en el ensayo de compresión.

Módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young designa a la constante de proporcionalidad que relaciona la tensión con la deformación unitaria. Es una propiedad intrínseca de cada material.

*Módulo de elasticidad transversal* es un término que expresa la relación entre el cambio de forma que experimenta un material bajo la acción de esfuerzos cortantes

La definición de *galga extensométrica* puede entenderse como la de un sensor cuya resistencia se ve alterada por causa de la acción de esfuerzos que la deforman, todo ello debido al efecto piezorresistivo.

La expresión *frecuencia de resonancia* hace referencia a una frecuencia natural de vibración determinada por los parámetros físicos del objeto vibrante.

### **1.6 Límites de la investigación: alcance y supuestos previos**

El alcance de la investigación viene determinado por el número de probetas de las que se dispone y que son suministradas por la propuesta de investigación mencionada en 1.2, por lo que se trata de determinar un procedimiento estándar a la hora de realizar futuros ensayos con el mismo material.

Supondremos que las probetas proporcionadas por el departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Universidad de Sevilla para la realización de este proyecto se ajustan a las normas utilizadas para los ensayos; a saber: UNE-EN 14146:2004 “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad dinámico (con la medida de la frecuencia de resonancia fundamental)” (AEN/CTN 22, 2004) y UNE-EN 14580:2006 “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad estático” (AEN/CTN 22, 2006).

### **1.7 Conclusión**

El proyecto llevado a cabo supone para la autora que suscribe estas líneas una experiencia sumamente enriquecedora; un capítulo de aprendizaje supervisado por los tutores del PFG con un importante componente práctico que ha servido para poner a prueba la validez de los conocimientos y aptitudes adquiridas a lo largo del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales cursado en la Universidad de Málaga.



## 2 Contextualización de la investigación de caracterización mecánica en elementos pétreos

### 2.1 Relación pormenorizada de estudios recientes

Con el fin de contextualizar esta investigación se analizan estudios recientes sobre la caracterización mecánica de la piedra calcarenítica como elemento estructural de monumentos históricos realizados mediante ensayos tanto destructivos como no destructivos.

La investigación del Doctor Vicente Brotons Torres de la Universidad de Alicante titulada “Propiedades físicas y mecánicas de una calcarenita: la Piedra de San Julián” (Brotons Torres, 2014), estudia la alteración de las características mecánicas tras verse expuestas a diferentes situaciones como son la fluencia y las altas temperaturas que pueden llegar a ser alcanzadas durante un incendio. Para completar el trabajo se evalúa la relación entre los módulos de elasticidad estático y dinámico, obteniéndose así un análisis de la fiabilidad del módulo de elasticidad dinámico, calculado utilizando métodos no destructivos, frente al módulo de elasticidad estático. De su estudio se extraen las siguientes conclusiones:

- La similitud del comportamiento en fluencia de la roca estudiada y de un hormigón tipo H01 utilizado como comparador.
- El dañino efecto de las altas temperaturas en el comportamiento mecánico de la piedra, así como del método de enfriamiento empleado, demostrando que un enfriamiento por agua degrada aún más las propiedades ya de por sí alteradas.
- Demostrando una relación más estrecha con el presente PFG, la gran utilidad que implica la utilización de métodos no invasivos para la determinación de características mecánicas –como puede el módulo dinámico de elasticidad en elementos estructurales históricos– debido a que las bajas propiedades mecánicas generales de la piedra acarrearán que no sea apreciable con facilidad la diferenciación entre los módulos dinámico y estático.

Por consiguiente, y de acuerdo a lo expresado, se podrá usar un método no invasivo para caracterizar ese mismo tipo de piedra sin alterar el elemento estructural.

El estudio “Assessing the reliability of non-destructive and moderately invasive techniques for the evaluation of uniaxial compressive strength of Stone masonry units”, realizado por Emilia Vasanelli, Angela Calia, Donato Colangiuli y Francesco Micelli, miembros todos ellos del Instituto para el Patrimonio Arqueológico y Monumental de Lecce (Italia), junto con Maria Antonietta Aiello, de la universidad de la misma localidad (Vasanelli, y otros, 2016), ha servido para evaluar diferentes métodos destinados a la

determinación de la resistencia a la compresión uniaxial de la piedra extraída en la mencionada región de la península itálica. Esta piedra parece ser una caliza blanda y porosa, similar a la empleada en el proyecto que se detalla en esta memoria de PFG. Los resultados obtenidos a partir de la citada investigación concluyen que las técnicas no invasivas, tales como la medida de la velocidad de pulsos ultrasónicos, son equiparables a las pruebas convencionales de obtención del módulo de elasticidad mediante ensayo de compresión uniaxial, obteniéndose altos valores de correlación lineal. De esta manera se consigue obtener información física de elementos estructurales sin alterar el monumento.

El artículo “Mechanical characterization of limestone from sound velocity measurement” realizado por Tohams Parent, Nathalie Domede, Alain Sellier, de la Universidad de Toulouse, junto con Ludivine Mouatt (Ginger CEBTP) (Parent, y otros, 2015), analiza las características mecánicas (densidad aparente, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad estático y coeficientes de Poisson) de un tipo de piedra caliza extraída del Priorato de Saint Martin des Champs (París, Francia) utilizando la medida de la velocidad del sonido en el material. Mediante su estudio se llegan a relacionar las diferentes características entre sí, lográndose correlaciones con índices que superan el 0,60. Por consiguiente, y considerando tales resultados, es posible establecer que, usando técnicas no destructivas y basándose en las relaciones obtenidas, resulta factible caracterizar muchos elementos estructurales *in situ*, sin necesidad de alterar su estado, mediante técnicas no invasivas y a través del uso del análisis numérico de la velocidad del sonido en esos medios físicos.

## 2.2 Marco teórico de la metodología empleada

En esta investigación se obtiene, entre otros parámetros, el módulo de elasticidad de la piedra objeto de estudio mediante ensayos estático y dinámico. En ambos casos se utilizan tecnologías muy diferentes que se aclaran a continuación.

### 2.2.1 Ensayo estático

El ensayo estático consiste en someter a las probetas, sin confinar, a esfuerzos de compresión (ensayo de compresión uniaxial). Conocidas las dimensiones de la probeta y la fuerza aplicada, se calcula el módulo de elasticidad estático como la razón entre la tensión que se ejerce sobre la muestra y la deformación unitaria que experimenta, de acuerdo a lo expresado en la fórmula que se muestra a continuación:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

En dicha fórmula, la tensión supone el cociente entre la fuerza aplicada y la superficie sobre la que se aplica, siendo la deformación la razón entre la disminución de su longitud y la distancia entre la que se mide esa reducción de longitud.

Para determinar la variación longitudinal que experimenta la pieza al ser sometida a una carga se hace uso de las galgas extensométricas y de LVDT, de modo que con la doble obtención de un mismo valor por diferentes técnicas permita una comparativa con la que determinar la fiabilidad de ambas y poder realizar ensayos con tan solo una de ellas, en el caso de la imposibilidad de usar ambas; bien por limitaciones dimensionales o por impedimentos del estado superficial de las muestras.

El principio teórico de la medición con galgas por resistencia, cuyo tipo es el utilizado en este proyecto,

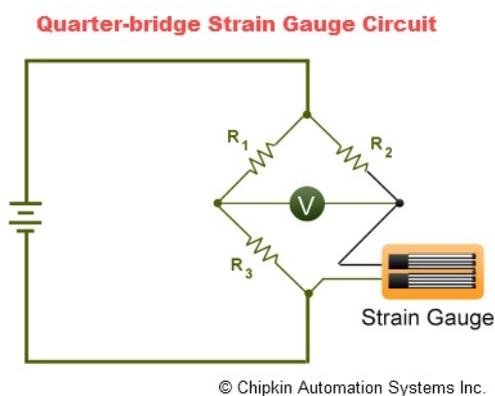


Ilustración 1. Circuito representativo cuarto de puente de Wheatstone

se basa en el puente de Wheastone: un circuito consistente en cuatro resistencias en serie formando un bucle cerrado, de manera que cuando el puente está equilibrado el producto de dos resistencias opuestas es igual al producto de las dos restantes. Para los ensayos se utiliza la configuración de “cuarto de puente”, lo que supone que el elemento variable es la resistencia que proporciona la galga y que varía en función de la deformación que sufra.

$$\frac{dR}{R} = K \frac{dL}{L} \quad (2)$$

En la ecuación precedente, K representa el *factor de galga*, constante intrínseca de cada dispositivo proporcionada por el fabricante.

El transformador diferencial variable lineal (LVDT) es un tipo de captador eléctrico analógico de desplazamiento. Dentro de los tipos de captadores de desplazamiento pertenece a los de tipo *inductivo acoplado*, de modo que se rige por los cambios de inductancia de un devanado, originados por el desplazamiento de un núcleo de material magnético

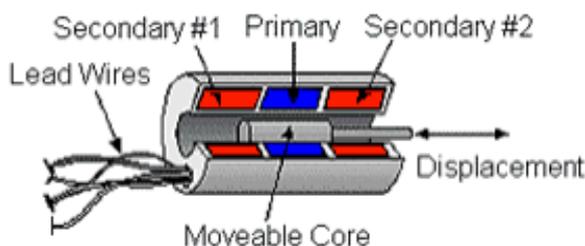


Ilustración 2. Esquema interno de LVDT

dentro de dicho bobinado. El LVDT está formado por tres bobinas arrolladas sobre una barra. Un núcleo ferromagnético de forma cilíndrica, sujeto al objeto cuya posición desea ser medida, se desliza respecto a las bobinas a lo largo del eje de la barra. La bobina

central se conoce como “bobinado primario” y las extremas como “bobinado secundario”, dispuestos de forma simétrica respecto a su centro. El funcionamiento de tal dispositivo funcionamiento se fundamenta en la variación de la inductancia mutua entre el primario y cada uno de los secundarios al desplazarse a los largo de su interior el núcleo ferromagnético, arrastrado por un vástago no ferromagnético unido a la pieza cuyo movimiento se desea medir. Al alimentar el primario con una tensión alterna, en la posición central las tensiones de cada secundario son iguales, si bien, al apartarse de dicha posición, una de las dos crece y la otra decrece en la misma magnitud.

La magnitud del voltaje de salida es proporcional a la distancia en la que se encuentra desplazado el núcleo.

### 2.2.2 *Ensayo dinámico*

En el ensayo dinámico se obtiene el módulo de elasticidad, tanto longitudinal como transversal, de las probetas. El método dinámico empleado se conoce como “obtención del módulo de elasticidad mediante la medida de la frecuencia de resonancia fundamental de excitación por impulso”. Al haber quedado ya definida la frecuencia de resonancia en el apartado 1.5, se procede a especificar la frecuencia de resonancia fundamental, siendo, en este caso, la resonante más baja de un objeto vibrátil.

Este método de ensayo mide la frecuencia de resonancia de los especímenes, cuya geometría es conocida, excitándolos mediante un impulso realizado con un pequeño martillo de acero. De esta forma una onda se propaga a través del material hasta llegar, en esta configuración, a un acelerómetro, situado en la posición indicada para cada tipo de ensayo, que detecta la señal resultante y la transforma en una eléctrica, que será almacenada y tratada por el correspondiente software. La amplitud y la frecuencia de dicha señal son medidas para obtener la frecuencia de resonancia. Considerando las dimensiones de la probeta, su masa y la frecuencia de resonancia adquirida, es posible proceder al cálculo del módulo de elasticidad de la pieza experimentada.

La utilización de dos tipos de configuraciones en cuanto a la ejecución de la prueba se refiere conduce a la obtención del módulo de elasticidad transversal y longitudinal. Cada composición regula las posiciones de los diferentes puntos de apoyo sobre los que depositar la probeta, la colocación del acelerómetro receptor de la señal resultante y la localización del punto de excitación. Las diferentes modalidades de ensayo vienen especificadas por norma, teniendo en cuenta la diferencia existente entre la regulación UNE y la ASTM, que reside, fundamentalmente, en el punto de generación de la onda en el ensayo transversal.

La colocación precisa de la probeta evita la disipación y distorsión de la onda al colocar los puntos de apoyo en los nodos de la ondulación propagada, como es posible apreciar en Ilustración 3 y siguientes.

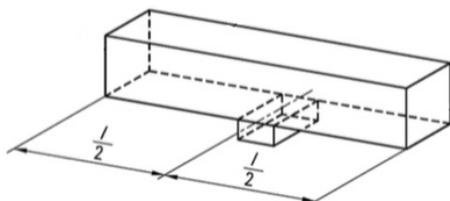


Ilustración 3. Disposición de probeta para ensayo longitudinal.

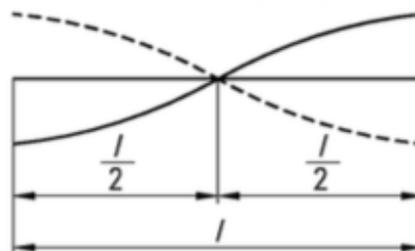


Ilustración 4. Propagación de la honda en ensayo dinámico longitudinal.

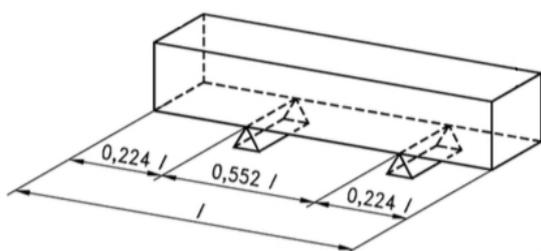


Ilustración 5. Disposición de probeta para ensayo transversal.

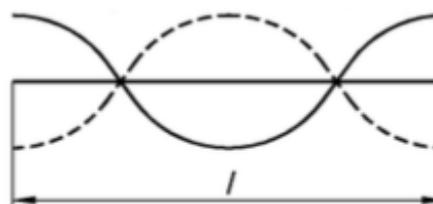


Ilustración 6. Propagación de la honda en ensayo dinámico transversal.

Para la configuración del ensayo longitudinal de una probeta de sección circular, los cálculos que siguen demuestran la relación existente entre el módulo de elasticidad longitudinal y la frecuencia fundamental.

$$E = 1,6067 \left( \frac{L^3}{D^4} \right) (m f_f^2) T \quad (3)$$

En la ecuación, la nomenclatura es la siguiente:

D = diámetro medido en milímetros.

T = factor de corrección para la configuración a flexión.

L = longitud de la probeta, medida en milímetros.

m = masa de la probeta, medida en milímetros.

$f_f$  = frecuencia de resonancia fundamental en flexión, medida en Hertzios.

$$T = 1 + 4,939(1 + 0,0752\mu + 0,819\mu^2) \left(\frac{D}{L}\right)^2 - 0,4883 \left(\frac{D}{L}\right)^4 - \left[ \frac{4,691(1 - 0,2023\mu + 2,173\mu^2)(D/L)^4}{1,000 + 4,754(1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2)(D/L)^2} \right] \quad (4)$$

En esta expresión,  $\mu$  designa al coeficiente de Poisson.

Si  $L/D \geq 20$ , entonces el término T puede ser simplificado hasta obtener la siguiente ecuación:

$$T = [1,000 + 4,939(D/L)^2] \quad (5)$$

En el caso de no cumplirse la condición  $L/D \geq 20$ , no obstante lo cual se disponga de un coeficiente de Poisson conocido, la ecuación (3) puede ser obtenida de forma directa. En el caso de no conocer previamente el coeficiente de Poisson, se asume un valor lo más aproximado posible para comenzar las iteraciones.

La obtención del módulo de elasticidad transversal requiere una configuración a torsión. Las ecuaciones que rigen su cálculo es la siguiente:

$$G = 16mf_t^2(L/\pi D^2) \quad (6)$$

## 3 Metodología de la investigación

### 3.1 Justificación de la metodología

Esclarecer una correcta metodología es la pauta principal que permite realizar una investigación fiable de manera optimizada. Muy diversos factores han influido a la hora de elegir la más apropiada para cada ensayo llevado a cabo en PFG, y en el presente apartado se relatan detalladamente, separando en subsecciones cada tipo de ensayo.

#### 3.1.1 Ensayo estático

Para determinar el módulo de elasticidad de las probetas por medio de un ensayo estático se selecciona el ensayo a compresión uniaxial, de acuerdo a lo expuesto por la norma UNE-EN 14580 "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad estático" (AEN/CTN 22, 2006; AEN/CTN 22, 2004). La norma citada no se sigue en su totalidad, si no que se toma como referencia para preparar y ajustar el ensayo, debido a la deficiente calidad dimensional de las muestras, que no se ajustaba a normativa, mediante las cuales se preparó una puesta a punto de la metodología.

Se diseña y fabrica un extensómetro que alojará los LVDT que se utilizan para medir las deformaciones longitudinal y transversal que sufre la probeta durante el ensayo de compresión. El extensómetro se fija por sus propios medios a la probeta para disminuir distorsiones en las mediciones. El diseño se basa en modelos ya existentes en el mercado, adaptados a las necesidades específicas de las muestras, en cuanto a forma, dimensiones y capacidad portante de la piedra. Se toma la decisión de la fabricación propia para obtener un producto específico que se amolde en la mayor medida posible a las necesidades del ensayo; de este modo, algunos aspectos que intervienen en el proceso de diseño son la capacidad de sujeción firme sin comprometer la estructura de un material frágil como es la piedra caliza, el acoplamiento de los dispositivos de medición que ya se poseen, la comodidad en el manejo y montaje que permita su uso para un solo usuario con el menor número posible de herramientas necesarias.

La captación de la variación de longitud sufrida por la probeta durante el ensayo de compresión, se realiza mediante dos tecnologías diferentes: medición por LVDT y por galgas extensométricas. De este modo se obtiene una comparativa que permite analizar la validez del sistema de medición con LVDT, así como su similitud con el sistema mediante galgas.

Este proyecto puede representar la antesala de futuros ensayos que se realizarán para la caracterización mecánica de piedra natural a diferentes grados de humedad y con tratamientos de consolidación, pero la opción de medir deformación con galgas no será factible en el caso de no disponer de las condiciones

superficiales necesarias para el pegado de las mismas. Por ello se pone a prueba el sistema de medición con LVDT, para asegurar su correcto funcionamiento, la veracidad de los resultados y para obtener una visión general de la facilidad de uso.

La norma UNE-EN 14580 especifica en su apartado 6.3.2 “Dimensiones de las galgas” que “la longitud mínima de la galga debe ser igual al diámetro o a la dimensión de la sección más grande de la probeta”. En el caso del presente PFG no ha sido posible obtener galgas de tan grandes dimensiones, por lo que se han utilizado las de mayor medida que resultaran económicamente accesibles. Las escogidas han sido galgas de 25 mm con terminales de conexión integrados, de modo que la unión soldada con los cables transmisores de datos quedara lo más alejada de la galga y así no comprometer su funcionamiento con un calentamiento excesivo de la zona. Según normativa el tamaño de galga utilizado debiera ser de 100 mm, de este modo se conseguiría una relación de 10:1 entre la zona de medición de la galga y el tamaño del grano de cristal más grande de la piedra, salvando la heterogeneidad del material. El no cumplimiento de esta especificación hace que la medida mediante esta tecnología no sea exacta pudiendo arrojar resultados erróneos al verse distorsionados por poros u oquedades en el interior de la muestra.

### 3.1.2 *Ensayo dinámico*

Tomando como referencia de partida la norma UNE-EN 14146 (AEN/CTN 22, 2004) se obtiene el módulo de elasticidad por ensayo dinámico mediante la medida de la frecuencia de resonancia fundamental con el método de excitación por impulso mecánico. El ensayo se ejecuta siguiendo el manual del operador incluido con el equipamiento empleado para realizar el ensayo dinámico, proporcionado por el departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Universidad de Sevilla, responsable de la elaboración de la tesis doctoral para la que se usarán los resultados obtenidos en este PFG. El instrumental utilizado se ajusta a la norma ASTM C-215 (ASTM C215, 2003), así como el procedimiento expuesto por el mismo por el cual se rige el ensayo que se realiza.

## 3.2 **Descripción de los procesos metodológicos**

En esta sección se describen cada uno de los procesos que se han llevado a cabo para la ejecución de este proyecto. Al igual que en la sección anterior, se divide en subsecciones para diferenciar los ensayos dinámico y estático, con la adición de una subsección que muestra los procesos que anteceden a las tandas de ensayos.

### 3.2.1 Preparación previa

#### 3.2.1.1 Diseño y fabricación de extensómetro

El primer desafío que ha planteado esta investigación ha sido el diseño y fabricación del extensómetro. La idea se basa en crear un sistema de sujeción para los sensores electrónicos medidores del desplazamiento, los LVDT, de manera que su acoplamiento a la probeta no cree distorsiones que puedan generar mediciones erróneas y, por consiguiente, un análisis no válido.

Con el fin de obtener una idea de partida, se ha realizado una investigación previa para obtener información acerca de los dispositivos ya existentes en el mercado que se adaptaran mejor a los objetivos que se deseaba alcanzar, tales como los que se muestran a continuación.

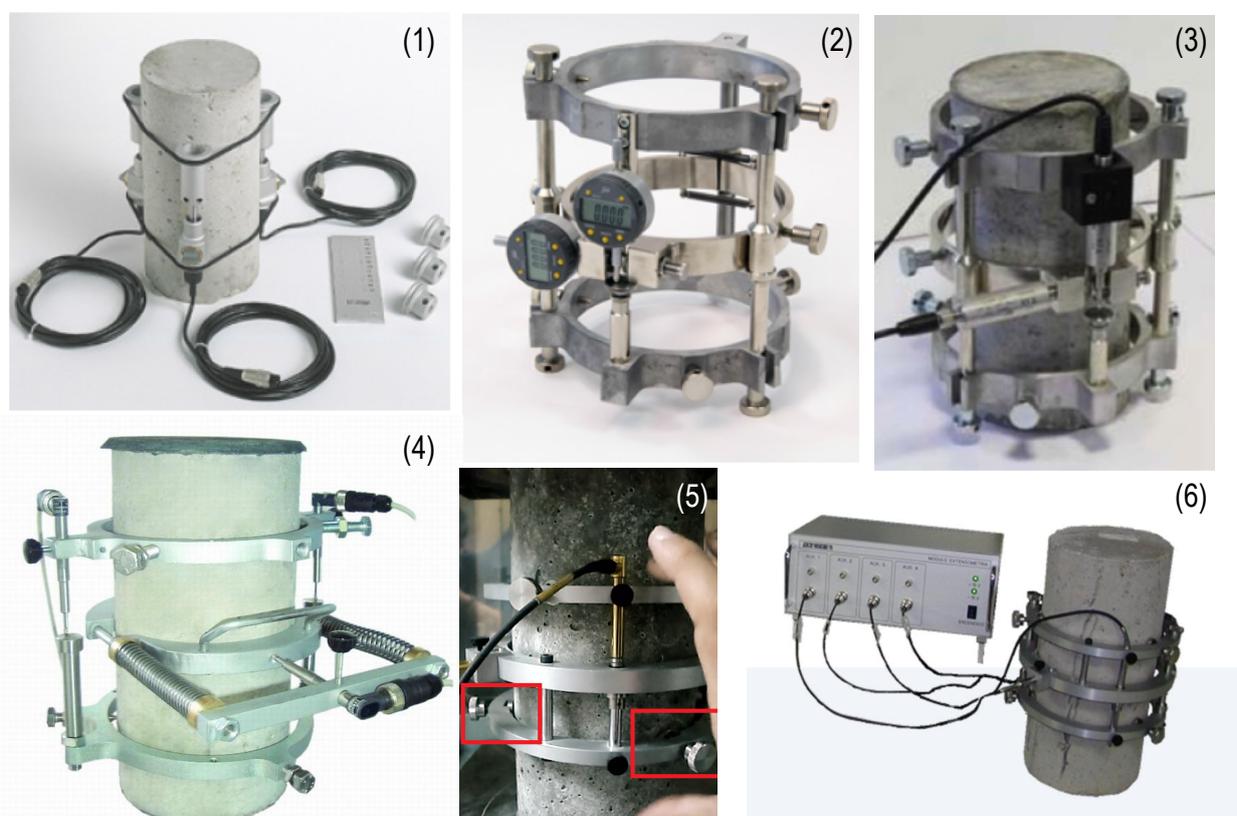


Ilustración 7. Dispositivos existentes en el mercado tomados como referencia para la fabricación del extensómetro.

El diseño final del extensómetro está formado por tres anillos. Los anillos superior e inferior sujetan los LVDT encargados de medir la deformación longitudinal. El anillo central se compone de dos arcos de circunferencia y sostiene el brazo auxiliar donde se fija el LVDT dispuesto para medir la deformación transversal.

Una vez aclarado el modelo a seguir, se ha procedido a la creación de los planos; para ello se ha hecho uso del programa *SolidWorks*. Los planos de diseño de cada una de las pizas se muestran en el anexo 7.2.

Cuatro de las cinco piezas que conforman el conjunto de extensómetro se ha fabricado a partir de la máquina de control numérico por computador, de ahora en adelante CNC. Una vez obtenidos los planos se ha procedido a la creación de los programas que debe ejecutar la CNC para crear cada pieza.

Los códigos han sido elaborados por el técnico de Grado Medio de Apoyo a la Docencia e Investigación, don Manuel José Herrera Fernández. En total han sido creados dos programas: el primero para la fabricación de las piezas uno y dos (anillos superior e inferior), y el segundo para el anillo central, piezas tres y cuatro. Los códigos de ambos programas se encuentran reflejados en el apartado 7.1 "Códigos de ejecución de las piezas en la máquina de control numérico" del presente documento.

El material seleccionado para la fabricación del extensómetro ha sido aluminio. Se han adquirido dos chapas de 300 x 200 x 25 mm y una tercera de 200 x 200 x 12 mm. Este material proporciona la rigidez necesaria para sustentar los sensores y el brazo auxiliar, a la vez que permite cierto grado de flexibilidad para facilitar el montaje en la probeta; además, al ser un material ligero hace más cómodo el transporte y no supone un aumento excesivo de peso. El proceso de fabricación del extensómetro dio comienzo el once de julio de 2016.

Tras la obtención de la pieza uno haciendo uso de la CNC, se le realizaron las operaciones necesarias para albergar los mecanismos de sujeción pieza-extensómetro y el sistema de sujeción de los LVDT. Para anclar el extensómetro a la probeta se realizaron dos taladros pasantes de 6,2 mm de diámetro y un taladro roscado de métrica seis. Para obtener el mecanismo de sujeción de los LVDT se ejecutaron dos taladros pasantes de 82 mm de diámetro, dos procesos de fresado para crear las ranuras de los salientes laterales y por último, en cada uno de los salientes laterales, dos taladros en los que un sistema de tornillo y tuerca ejercieran presión para fijar el LVDT en ese punto.



Ilustración 8. Pieza 1 del conjunto extensómetro.

En la pieza número dos se realizaron las mismas operaciones que en la número uno para obtener el mecanismo de sujeción pieza-extensómetro, es decir, dos taladros pasantes de 6,2 mm de diámetro y un taladro roscado de métrica seis para alojar los tornillos. Por último, en los salientes laterales se practicaron dos taladros roscados de métrica ocho.

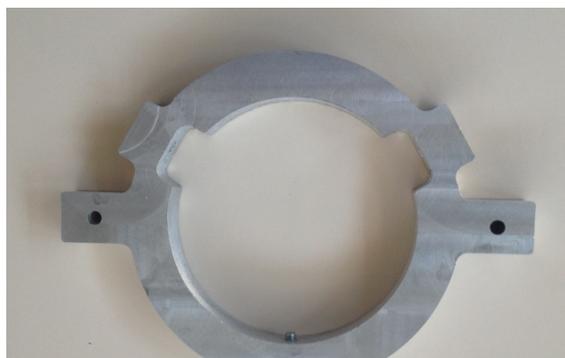


Ilustración 9. Pieza 2 del conjunto extensómetro.



Ilustración 10. Piezas 3 y 4 del conjunto extensómetro.

A la pieza número tres se le realizaron dos taladros pasantes en sus extremos de 6,5 milímetros de diámetro; mientras que a la pieza número cuatro se le realizan dos agujeros roscados, uno en cada extremo, de métrica seis. Mientras que no se indique lo contrario, todos los pasos de rosca son de paso normal.

Para obtener la pieza número cinco se cortó, mediante una sierra de cinta, un prisma rectangular con un saliente en la parte central. Se le practicaron dos taladros de métrica seis de forma que coincidieran con los practicados en las piezas 3 y 4; así, el conjunto del brazo auxiliar quedaba alineado.



Ilustración 11. Pieza 5 del conjunto extensómetro.

En el centro del prisma y en la misma dirección que los taladros para el brazo auxiliar, se taladró un agujero pasante de 19 mm de diámetro que albergara el LVDT transversal. Por último, este mencionado LVDT se fijó mediante un tornillo con cabeza de plástico, llamado volante, y para ello se abrió un taladro de métrica 5 en el centro del prisma pero en dirección perpendicular al anterior taladro.

El conjunto final se vale de tornillos, arandelas, tuercas, muelles y varillas roscadas para adquirir su forma completa y sujetarse a la probeta. Con el fin de aclarar su funcionamiento se adjuntan imágenes de cada una de las partes por separado pero con su montaje final.

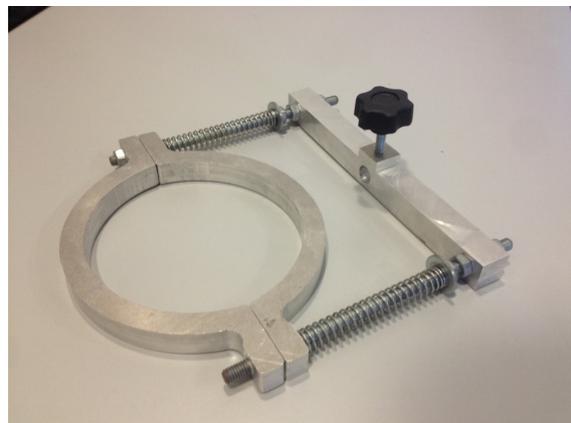
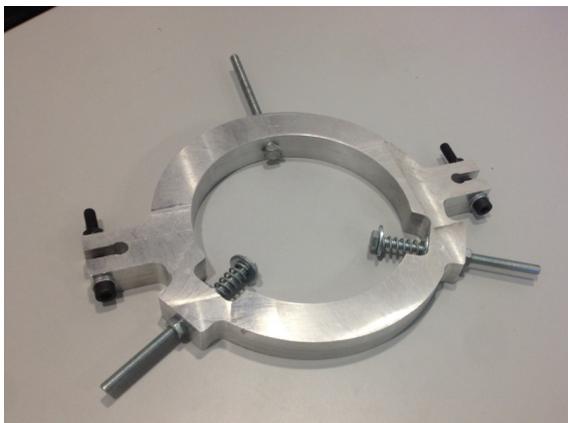


Ilustración 12. Anillos superior (izquierda) e intermedio (derecha) del conjunto extensómetro.

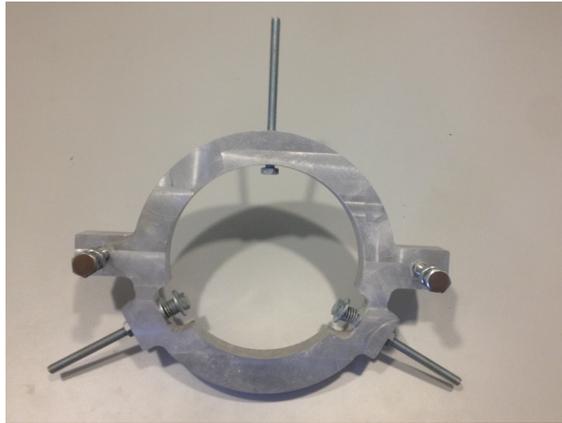


Ilustración 13. Pieza 2, anillo inferior.

A continuación se adjunta una tabla detallando la relación de elementos auxiliares adquiridos para completar el montaje del extensómetro.

Tabla 1. Relación de material adicional adquirido para el conjunto extensómetro

Cantidad	Elemento
2	Tornillo cabeza Allen DIN 912 M6 x 40 mm.
6	Tornillo cabeza hexagonal DIN 933 M6 x 90 mm.
2	Tornillo cabeza hexagonal DIN 933 M8 x 100 mm.
6	Muelle abierto 10 x 1,2 mm.
2	Tuerca DIN 934 M8.
13	Tuerca DIN 985 M6.
2	Varilla roscada DIN 975 M6.
1	Volante macho M5 x 25.
4	Arandela DIN 125 6 mm.
10	Arandela DIN 9021 6 mm.

El conjunto completo del extensómetro, incluido material adicional, posee un peso de 1.634,2 g.

Una vez obtenido el dispositivo en su totalidad se realizaron pruebas para verificar su correcto funcionamiento como elemento de sustentación y su capacidad de fijación. Unas imágenes muestran dichas pruebas.

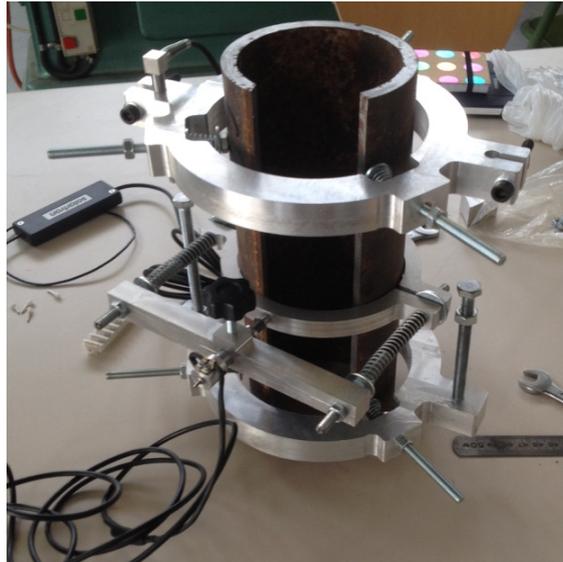


Ilustración 14. Prueba de funcionamiento.

### 3.2.1.2 Preparación de la tanda de ensayos

El día veintiuno de julio de 2016 se recibió el envío realizado por el equipo de investigación que lleva a cabo la tesis doctoral de la cual depende este PFG, con todos los elementos necesarios para realizar las tandas de ensayos, incluyendo las probetas de piedra caliza. Se redactó un inventario completo de todos los enseres recibidos y un reconocimiento general de las probetas de ensayo.

En relación al objeto protagonista del proyecto, las probetas, se suministraron seis de forma cilíndrica para ser ensayadas. Las muestras habían sido extraídas de tres vetas de piedra diferentes, quedando identificadas como “Veta I”, “Veta II” y “Veta III”. Con el fin de llevar un seguimiento preciso se marcaron las probetas con las letras A o B, para cada una de las vetas a las que pertenecían, resultando el siguiente etiquetado: piedra IA, piedra IB, piedra IIA, piedra IIB, piedra IIIA y piedra IIIB. Se realizó una inspección visual sobre las muestras en la que inicialmente se observó con facilidad la baja calidad dimensional de las probetas, que presentaban fallos tales como falta de perpendicularidad del eje longitudinal de los cilindros con el eje horizontal, irregularidad en la cara lateral (línea generatriz) o hendiduras en las caras planas. Se realizó un informe pormenorizado del estado de recepción de las probetas.

Probeta IA: Presenta una grieta en parte de su cara lateral. No hay indicios de que resulte una grieta interna. Presenta inclinación en su eje longitudinal con respecto al plano horizontal.

Probeta IB: Presenta ciertos puntos de hendiduras en la cara lateral, no se perciben como defectos que puedan afectar a la estructura de la muestra.

Probeta IIA: Presenta inclinación en su eje longitudinal con respecto al plano horizontal, así como irregularidades superficiales en su cara lateral.

Probeta IIB: Presenta una gran irregularidad superficial, no hay indicios de que resulte ser una grieta interna. Presenta inclinación en su eje longitudinal con respecto al plano horizontal.

Probeta IIIA: Presenta inclinación en su eje longitudinal. La generatriz del cilindro resulta bastante irregular.

Probeta IIIB: Presenta ciertos puntos de mordida en su cara lateral. La cara lateral no sigue una generatriz regular.

Una vez se realizó un análisis superficial se almacenaron las probetas en un horno de secado durante 72 horas a una temperatura de  $70 \pm 5$  °C, para obtener una reducción de humedad previa a la tanda de ensayos.

### 3.2.2 *Ensayo dinámico*

El ensayo dinámico se lleva a cabo con el dispositivo “Emodumeter MK-II V-E-400” de la compañía *James Instruments*. El principio en el que se basa la sonda Emodumeter es la determinación de la frecuencia fundamental de resonancia mediante la vibración generada por un impacto sobre la probeta y detectada por un acelerómetro; de modo que el espectro de frecuencia es calculado y mostrado por el dispositivo. De forma automática calcula la amplitud máxima y las frecuencias se muestran directamente en la pantalla. Se dispone de una resolución de 4,9 a 78,1 Hz, una frecuencia de muestreo variable, por el usuario, de 10, 20 40 y 80 Hz; y una longitud de registro, que se puede ajustar a 1024 o 2048 puntos. A través del Emodumeter se controlan todos los parámetros de ensayo, incluyendo los anteriormente mencionados. Como se muestra en la Ilustración 15 posee una pantalla donde visualizar el interfaz del programa que lo rige y una serie de botones que se permiten controlar dicho programa. Posee una batería integrada de 12V con una autonomía de 4 a 10 horas, dependiendo del uso, lo que le dota de su carácter portátil. Se puede conectar a un ordenador y traspasar toda la información que se ha ido almacenando a lo largo de la tanda de ensayos para su posterior análisis. El conjunto incluye una bancada para sostener las probetas y, con las piezas auxiliares correspondientes, el acelerómetro en los distintos tipos de ensayos. Otro elemento de los que se compone el conjunto es un acelerómetro miniatura de sensibilidad  $0,979 \pm 5\%$  mV/m/s<sup>2</sup>, con un rango de frecuencia que oscila entre los 10 Hz y los 40 kHz y un rango de temperatura de funcionamiento de 0 a 40 °C.

Como elemento percutor se dispone de un juego de seis bolas de acero reforzado de diferentes diámetros, cuya elección dependerá del tamaño de la probeta sobre la que se realiza el ensayo, con las que

generar las vibraciones que posteriormente serán recibidas por el acelerómetro. Como elementos complementarios se incluyen cables de conexiones, cera para ajustar el acelerómetro a la pieza y un manual de usuario.



Ilustración 15. "Emodometer".



Ilustración 16. Bancada de equipo de ensayo dinámico.



Ilustración 17. Acelerómetro de equipo de ensayo dinámico

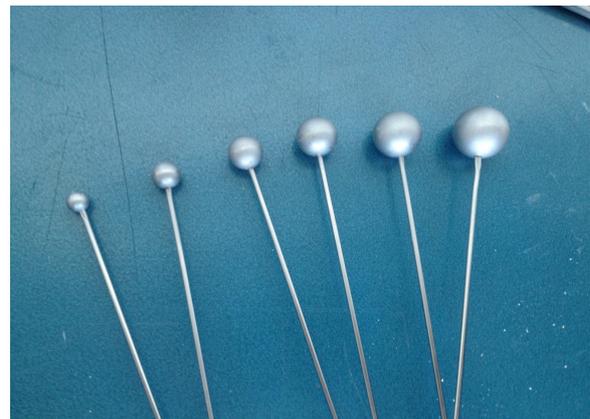


Ilustración 18. Bolas de acero reforzado de equipo de ensayo dinámico.

La normativa por la que se rige el equipo del ensayo dinámico es la ASTM C 215 "Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal and Torsional Frequencies of Concrete Specimens"; ASTM C 666 "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing"; EN 61000-6-3 "Electromagnetic compatibility (EMC). Generic standards. Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments" y EN 61000-6-2 "Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 6-2: Generic Standards-Immunity for industrial Environment".

El ensayo dinámico consta de dos partes. Una primera parte en la que se obtiene el módulo de elasticidad longitudinal y una segunda en la que se obtiene el módulo de elasticidad transversal.

Para la realización del ensayo se siguieron los siguientes pasos que se enumeran a continuación, acompañados de imágenes representativas de cada uno de ellos.

Se comenzó con el enfriado de las probetas hasta temperatura ambiente en campana desecadora. Para llevarlo a cabo se prepararon dos campanas desecadoras con arena de sílice.

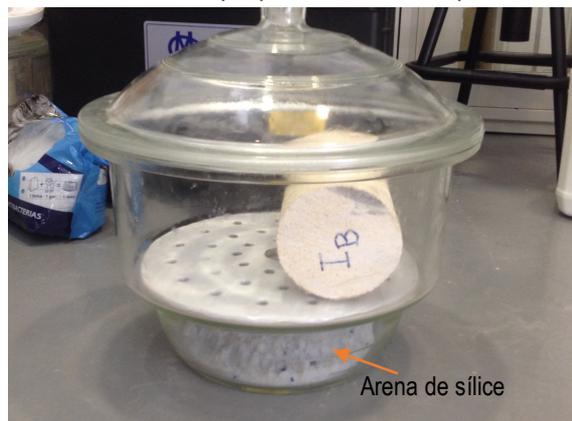


Ilustración 19. Campana desecadora acondicionada.

Una vez alcanzada la temperatura ambiente (aproximadamente  $30 \pm 2$  °C) se procedió al pesado de la probeta. No se disponía de una balanza con un rango suficientemente alto para medir el peso de las probetas, por lo que se recurrió al uso de dos balanzas electrónicas y, posteriormente, se sumaron los resultados mostrados por ellas. Se tomó las medidas correspondientes al diámetro y longitud de las probetas, con los

que junto al peso de cada una se obtuvo la densidad aparente.

Medición del módulo de elasticidad longitudinal. Este proceso requiere la utilización de la bancada, donde en su estructura media se fija la probeta centrada. En centro de una de las caras planas se coloca el brazo auxiliar que sustenta el acelerómetro, y éste se adhiere a la probeta mediante una pequeña cantidad de cera. El acelerómetro se conecta al *Emodumeter* mediante un cable de conexión para transmitir todos los datos. Se enciende el *Emodumeter* y se introducen los parámetros neces-



Ilustración 20. Pesado de probeta con doble balanza.

arios de la probeta para cada tipo de ensayo; en el caso de la obtención del módulo de elasticidad longitudinal se le suministró la forma de la probeta, el peso en kilogramos, la longitud en metros, y el diámetro en metros. Para culminar el ensayo, se deja a la máquina a la espera de la recepción de datos mientras, en la cara opuesta, se realiza un impacto con la bola de acero reforzado de mayor diámetro (16 mm).

Es importante señalar que se realizan diferentes pruebas con distinto calibres de bolas de acero, distintas ganancias, distintas frecuencias de ensayo y con diferentes cantidades de puntos de muestreo. Es posible deducir que si se desea obtener mayor resolución en los resultados se deben realizar las pruebas con la bola de mayor diámetro, a ganancia 10, a una frecuencia de ensayo de 80 Hz y 2.048 puntos de muestreo. Estos valores se mantienen para todos los ensayos, ya sean longitudinales o transversales, y para todas las probetas.

El esquema de posicionamiento de las muestras en la bancada de ensayo que muestra el manual de usuario del equipo es el anteriormente mencionado y es el que a continuación se acompaña.

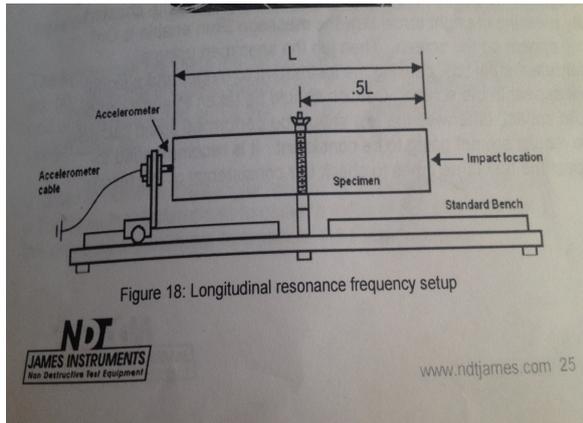


Ilustración 21. Esquema de posicionamiento de probeta para obtención del módulo de elasticidad longitudinal en ensayo dinámico.



Ilustración 22. Disposición de probeta para obtención de módulo de elasticidad longitudinal en ensayo dinámico.

Con esta disposición la onda se transmite a lo largo de la probeta, donde es captada en el extremo contrario de donde fue creada.

Como indica la norma UNE-EN 14146:2004 (AEN/CTN 22, 2004) se realizan tantas repeticiones del ensayo como sean necesarias hasta obtener tres resultados consecutivos con una diferencia menor a  $\pm 60$  Hz en la frecuencia de resonancia fundamental.

Tras obtener un número suficiente de resultados se procedió con la obtención del módulo de elasticidad transversal. Para lo cual se colocó la probeta en la posición indicada por el manual del operario de la máquina *Emodumeter* tal y como se muestra en la siguiente imagen.

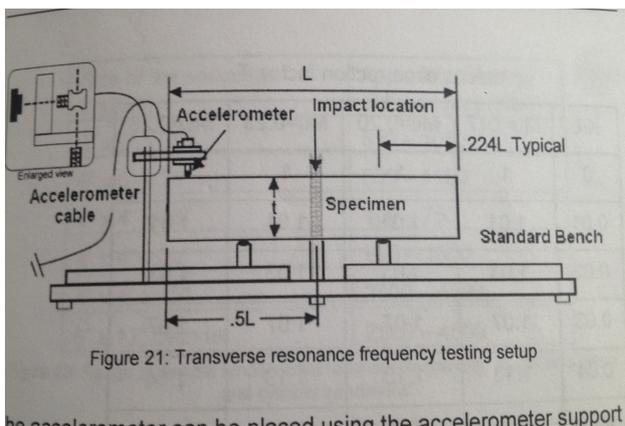


Ilustración 23. Esquema de posicionamiento de probeta para ensayo dinámico transversal.



Ilustración 24. Disposición de probeta para ensayo dinámico transversal.

Con el fin de no añadir un peso excesivo que dificultara el equilibrio de la muestra, se adhirió el acelerómetro a la probeta directamente mediante una pequeña cantidad de cera, sin hacer uso del brazo auxiliar; ambas opciones están contempladas como aceptables en el manual.

Se configuró el Emodometer convenientemente para esta prueba, indicando el tipo de ensayo, la forma de la probeta y sus dimensiones, de forma que la máquina quedara lista para la recepción de datos.

Con la bola de acero reforzado de mayor diámetro (16 mm) se golpeó la probeta en el centro de la parte superior, tal y como muestra el esquema del manual.

Una vez finalizada la tanda de ensayos para cada probeta se vuelven a almacenar en el horno a  $70 \pm 5^\circ \text{C}$  para eliminar la humedad que pueda haber absorbido durante el proceso del ensayo dinámico.

### 3.2.3 *Ensayo estático*

Al igual que el ensayo dinámico, este test comienza con el enfriado de la probeta hasta temperatura ambiente en las campanas de desecado. Una vez alcanzada una temperatura de  $30 \pm 2^\circ \text{C}$  se le realiza a cada probeta un planeado de las caras con el fin de conseguir la perpendicularidad entre el eje longitudinal de probeta y plano horizontal. Mediante una sierra circular se realiza el corte de un disco de entre 3 a 5 mm de grosor de cada una de las caras.

Durante el proceso de corte, debido a las vibraciones, la grieta aparentemente superficial que ya había sido detectada en la probeta IA pasó a ser claramente interna. La probeta no quedó fracturada por completo, pero directamente se descartó su intervención en el análisis posterior de los resultados, quedando como elemento de prueba para verificar el funcionamiento del equipo de ensayo dinámico.

Tras este proceso se vuelven a medir la longitud y el peso de la probeta. Con estas nuevas medidas y la sección de cada muestra se determina, la densidad aparente con el fin de determinar la veracidad en el proceso de pesado.

Este ensayo se lleva a cabo con la máquina de ensayo electromecánica de dos husillos, modelo ME-405/10 de *SERVOSIS*. Es una máquina para ensayos de tracción, compresión y flexión. Posee una capacidad de carga de 10 t, una velocidad máxima de trabajo de 200 mm/min, una precisión de  $\pm 1\%$  del 100% de la nominal tanto para la fuerza como para la posición. Su rango de luz axial libre tiene como mínimo los 0 mm y como máximo los 1200 mm. En los ensayos se utilizaros los accesorios circulares específicos de ensayos de compresión.

El siguiente paso fue el pegado de las galgas extensométricas en todas las probetas, excepto en la IA. Están fabricadas por la casa HBM, de resistencia  $120\Omega \pm 0,35\%$ , con un factor de galga de  $2,07 \pm 1,0\%$ , sensibilidad transversal  $0,0\%$ , con patillas conectoras (para el uso de terminales conectores auxiliares), de dimensiones  $25 \times 10 \text{ mm}$ .

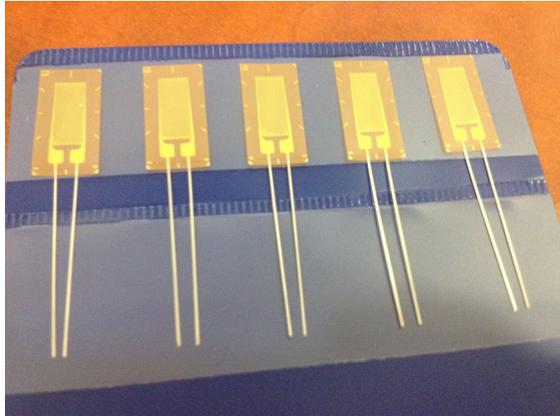


Ilustración 25. Galga extensométrica.

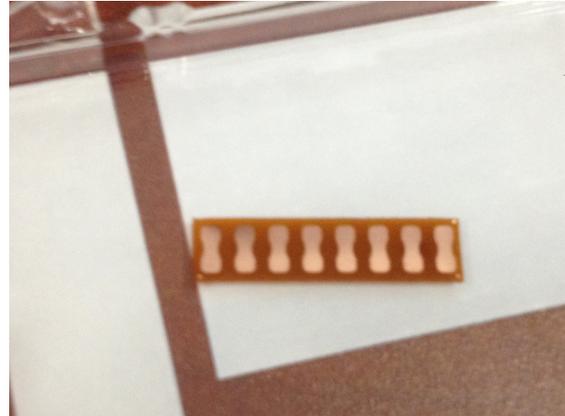


Ilustración 26. Terminales de conexión auxiliares.

Para este proceso se comenzó acondicionando la su-

perficie donde iría adherida la galga mediante una capa de pegamento rápido bifásico X60. Esta pegamento se elabora con la mezcla de dos componentes, un polvo de peróxido de dibenzoilo, que llaman componente A y metacrilato de metilo líquido, que llaman componente B; la proporción adecuada es de una cucharada de polvo por siete gotas de líquido. Para cada superficie se utilizó el doble de la proporción anteriormente mencionada debido a la necesidad de contar con una superficie lo suficientemente amplia para albergar la galga y procurarle un entorno limpio de impurezas y poros. Se vertió la mezcla de la resina y se aplanó para lograr una superficie lo más lisa posible. Seguidamente se lijó con hoja de grano n° 220 hasta lograr un acabado suave y sin rugosidad. Se obtuvieron superficies de aproximadamente  $40 \times 20 \text{ mm}$ . Una vez endurecida por completo la resina se le practicó una incisión muy superficial con un escalpelo, que sirvió de guía para pegar la galga vertical.

El proceso de pegado de la galga comenzó por la limpieza tanto de la superficie de pegado como de los útiles que se emplearon en el proceso. Para la limpieza se utilizó una gasa esterilizada impregnada con disolvente. Los utensilios que se usaron son: una placa de cristal de  $100 \times 100 \text{ mm}$ , pinzas metálicas de punta fina, escalpelo y cinta adhesiva transparente. Se tomó

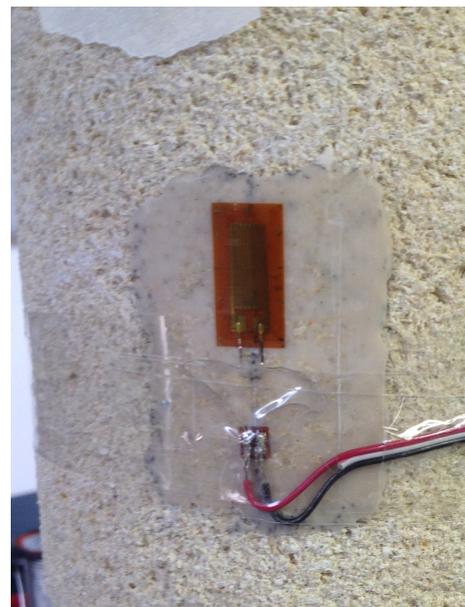


Ilustración 27. Galga extensométrica pegada sobre probeta.

cada galga con las pinzas y se colocó con los terminales hacia arriba sobre la placa de cristal. A continuación se cortaron unos 20 cm de cinta adhesiva, que se colocó sobre la galga. Con ella pegada en la cinta fue presituada sobre la marca que se hizo con el escalpelo. Por último, se procedió a pegar la galga a la resina haciendo uso de un adhesivo fuerte de contacto (en este caso *LOCTITE Super-Glue 3*).

Con un proceso idéntico al de pegado de la galga se procedió a adherir los terminales de conexión auxiliares a una distancia suficiente para evitar el calentamiento excesivo de la galga al soldar los cables a dichos terminales.

Finalmente se procedió a realizar la soldadura a los terminales auxiliares tanto las patillas de las galgas como los cables de conexión que transmitirían los datos generados por las galgas. El soldado se realizó con estaño, empleándose un estañador como fuente calorífica.

Este proceso se realizó dos veces por cada probeta, pues se colocaron dos galgas en cada una, situadas a 180° entre si y a 90° de los LVDT.

Antes de empezar con el ensayo se montó la parte hardware del sistema de captación, para lo cual se hizo uso de dos módulos de entrada analógica universal de 24 “NI 9219” de *National Instruments*, empleados para medir la excitación de voltaje que generan cada uno de los dispositivos que van conectados a ellos, que son los dos LVDT longitudinales y las dos galgas extensométricas. Cada módulo NI 9219 tiene cuatro canales diferenciales con seis puntos de conexión, un rango de voltaje máximo de -60V hasta 60V con una precisión de 243mV, un rango de voltaje mínimo de -0,125V hasta 0,125V con una precisión de 271μV y admite configuraciones de puente de Wheatstone de cuarto, medio y puente completo.

Los dos módulos NI 9219 se conectaron al chasis NI CompactCAQ USB de cuatro ranuras “NI cDAQ-9174”; a partir de ahora se hará referencia a ellos designando como “módulo 1” al conectado a la entrada uno del chasis y “módulo 2” al conectado a la entrada dos. Éste se conectó a la red eléctrica mediante un cable de alimentación y a su vez al ordenador con un cable USB, donde se encontraba instalado el software de la casa *National*



Ilustración 28. Módulo NI 9212.



Ilustración 29. Chasis NI cDAQ-9174.

*Instruments*. Funciona como puente de unión entre la parte física y la parte software del sistema de captación. Con los elementos del soporte físico montados se procedió a conectar cada dispositivo.

Módulo 1: como se ha dicho previamente, cada módulo tiene cuatro canales que se enumeran del 0 a 3; "Ch0", "Ch1", "Ch2" y "Ch3". En Ch0 y Ch1 se conectan los LVDT longitudinales, más concretamente en Ch0 el LVDT colocado a la derecha (observando la probeta de frente) y en Ch1 el LVDT izquierdo. En Ch2 se conecta el LVDT transversal cuya señal se recoge primero en el módulo de control de la máquina de ensayo de SEVOSIS, en el canal auxiliar dos (A2). En Ch3 se conecta la señal de fuerza que recoge también el módulo de control. Estos cuatro dispositivos transmiten voltaje y para ello se sigue la disposición de conexiones recogida en el manual del módulo 9219, que explica que los pines de conexión deben ser el 4 y el 5.

Módulo 2: En sus canales 0 y 1 se conectan cada una de las galgas que se encuentran adheridas a cada probeta. Las conexiones deben hacerse a través de los pines 3 y 5 de cada canal.

Es conveniente señalar que en el presente documento se hace expresa distinción entre los LVDT longitudinales y el LVDT transversal, primeramente porque miden deformaciones diferentes, pero también porque tienen procedencias diversas y, por consiguiente, funcionamientos distintos. Los LVDT longitudinales son elementos externos y necesitan alimentación, mientras que el LVDT transversal es un accesorio de la máquina para ensayos ME-405 de SEVOSIS, y aunque también necesite alimentación de la red eléctrica, esta se hace a través del propio módulo de control de la máquina que realiza la triple función de alimentar al dispositivo, sacar una señal externa para el sistema de captación de *National Instrument* y sacar otra señal al programa propio de SEVOSIS "PCD 2K"

Los LVDT longitudinales son de la marca *Solartron Metrology*, el modelo AXR/2.5/S de cable con salida radial. Tienen como características de medición un rango de  $\pm 2,5$  mm, con una precisión de  $2,5 \mu\text{m}$ ,  $0,15 \mu\text{m}$  de repetibilidad,  $0,7 \pm 0,14$  N de empuje a mitad de recorrido, un voltaje de excitación de 10 Vrms,  $2 \pm 0,1$  mA/V de corriente de excitación y una sensibilidad conectado de  $80 \pm 4$  mV/V/mm.

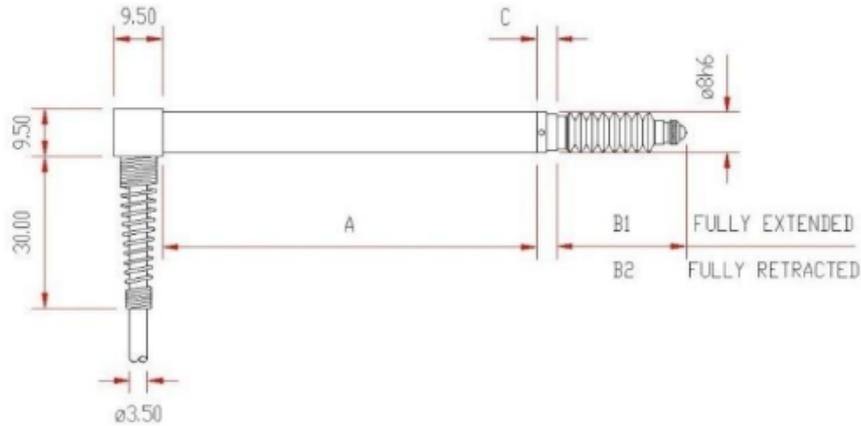


Ilustración 30. Esquemático de LVDT longitudinal.

Los LVDT longitudinales necesitan una alimentación que proporciona la fuente de alimentación de *LE-XITRON* de la serie FA. Debido a que los dos necesitan dicha alimentación se crea una pequeña red de conexiones mediante regletas para, con una sola fuente, alimentar a los dos dispositivos.

El sensor transversal, accesorio de la máquina de ensayo, de la serie CDL “Extensómetro de pinzado manual lateral o diametral” tiene un recorrido nominal de 4 mm, con un precisión de  $1\mu\text{m}$  y un 1% de linealidad.

Se muestra a continuación un esquema de las conexiones de los distintos dispositivos de medición con el sistema de captación.

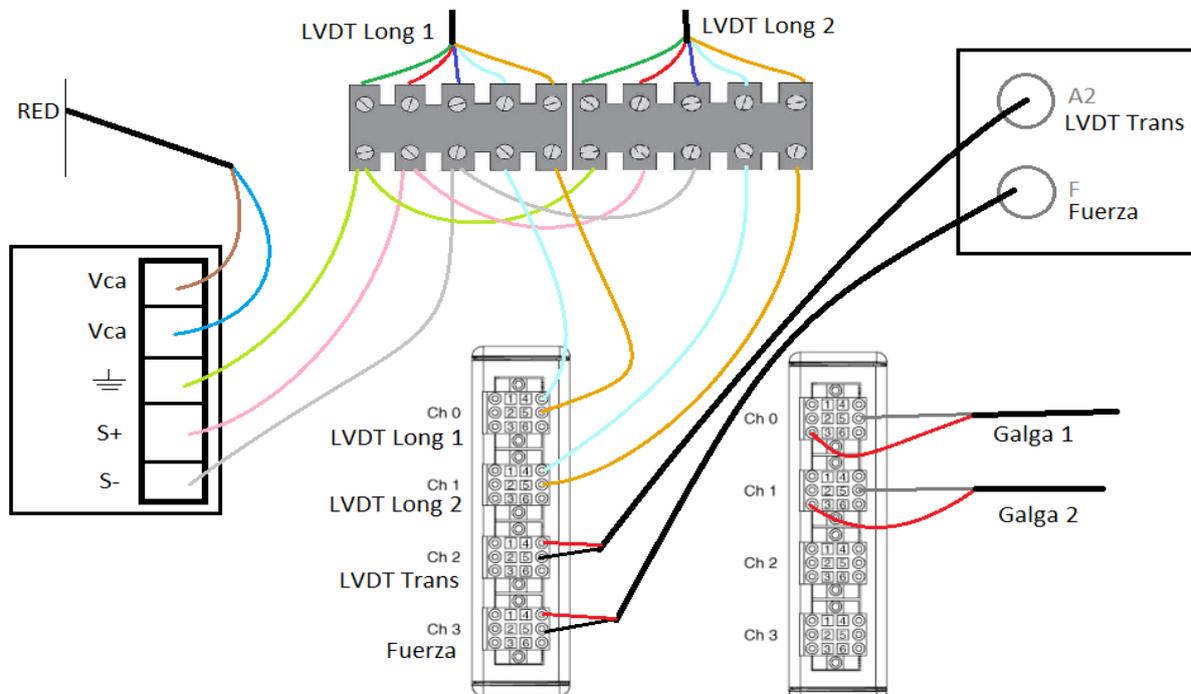


Ilustración 31. Esquema de conexiones para el equipo de captación.

Una vez ejecutada la parte electrónica del montaje se procedió a colocar el extensómetro en la probeta. Aunque su diseño permite un montaje sin necesidad de ayuda por parte de una segunda persona, sí se necesitan herramientas y útiles que faciliten su uso y aseguren una correcta fijación. La medida principal a tener en cuenta es la disposición de los anillos. La norma UNE-EN 14580 establece que las galgas deben abarcar una distancia igual o superior al diámetro de la probeta; en el caso que nos ocupa, al disponer de la tecnología de los LVDT, se extiende esa restricción también a ella, de forma que los LVDT abarcasen una distancia mayor al diámetro de cada probeta. La disposición de los anillos se realizó igual en cada probeta haciendo uso de calzos, de modo que entre el anillo superior e inferior siempre quedara una distancia de 133,07 mm. De esta manera se cumplía la restricción expresada por la norma en todas las probetas de las que se disponía.

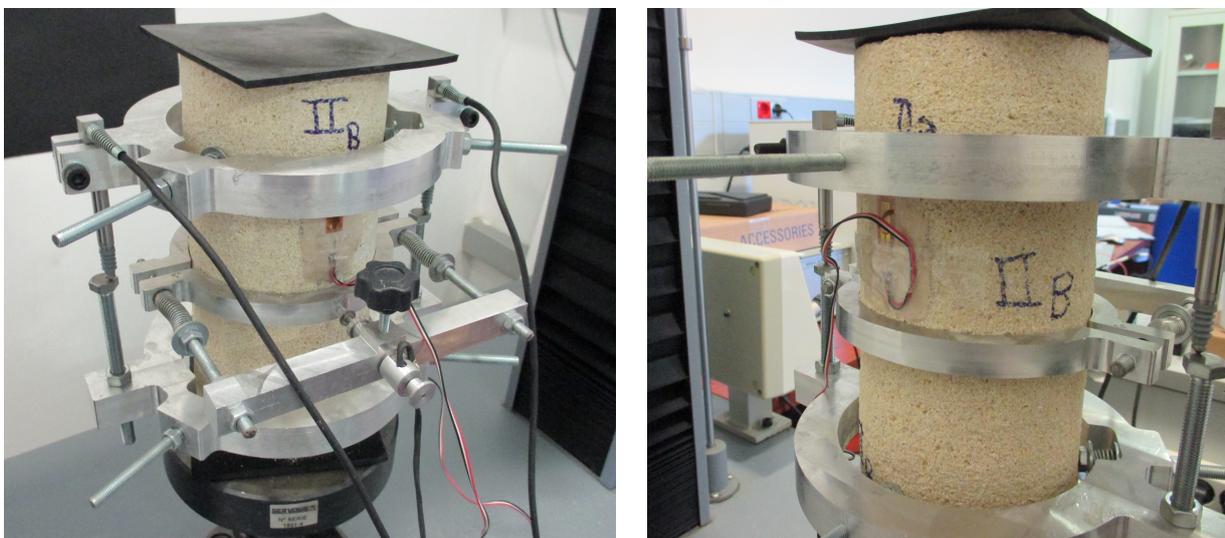


Ilustración 32. Extensómetro montado sobre probeta.

Con el extensómetro montado en la probeta se colocó todo el conjunto sobre la máquina de ensayo. Una última comprobación del correcto funcionamiento de las conexiones permitió disponer de un recurso para poder solucionar cualquier fallo que pudiera surgir. De forma preventiva, con un polímetro se comprobó la continuidad de cada punto de unión y la correcta medida de la resistencia en las galgas. Tanto sobre como debajo de la probeta se colocaron dos piezas de goma dura de 3 mm de espesor para compensar las irregularidades que pudieran tener las superficies de las caras de las probetas y para evitar que se convirtieran en puntos de concentración de tensiones cuando la máquina ejerciera presión sobre la muestra, generando una rotura en la pieza que pudiera inducir a error en el análisis de los resultados.

El último paso a dar antes de poner en marcha el ensayo fue configurar los dos programas encargados de recibir los datos arrojados por los dispositivos de medida y por la máquina de ensayos. En ambos casos se plantearon dos tipos de configuraciones, una permanente para todos los ensayos y otra que



Ilustración 33. Disposición de puesto de trabajo para tandas de ensayo estático.

se debería repetir con cada nueva prueba. Una somera descripción de la funcionalidad de cada programa se ofrece a continuación.

**SignalExpress:** Al inicializar el aplicativo él mismo detecta qué módulos tiene conectados, quedando sólo indicar qué canales debe tener en cuenta y qué tipo de señal va a recibir de ellos. El módulo 1 recibía cuatro señales de voltaje en las que se configuraron sus valores máximo y mínimo, y el módulo 2 recibía dos señales de galgas con configuración de cuarto de

puente, en los que se indicó la resistencia de la galga y su factor (como todas las galgas utilizadas en las pruebas son iguales estos dos últimos valores mencionados se mantienen para todos los casos). Por último como configuración permanente, se asignó la frecuencia de captación.

La parte de configuración que se debe realizar en todos los ensayos es el calibrado de las galgas. De esta manera el programa obtiene un valor de voltaje inicial para estos dispositivos.

**PCD2K:** Se le asignaron las características permanentes que se querían mantener en todos los ensayos: tipo de función, unidades de medida de la velocidad, frecuencia de obtención de datos, etc. Quedó como parámetro variable la velocidad a la que se movía el brazo compresor, que iba determinada por el módulo de elasticidad obtenido en los ensayos dinámicos.

Se dispusieron los dos ordenadores juntos de manera que se pudieran iniciar las grabaciones de datos a la vez por parte de los dos programas y así facilitar el posterior análisis de los resultados.

Mediante el programa SignalExpress se comprobó que los LVDT longitudinales estaban palpando la cabeza del tornillo fijado en el anillo inferior realizando una corta simulación que mostrara variación en la señal detectada por los LVDT. Mientras, con el programa PCD2K se comprobó que el LVDT transversal estaba palpando el anillo central; este mecanismo aseguraba que los dispositivos captarían desplazamientos en todo momento.

Con todo el equipo a punto y listo para captar, se procedió a iniciar el ensayo activando el grabado por parte de los dos programas y seguidamente iniciando la marcha de la máquina de compresión.

Se esperó hasta que la pieza fallara por completo y no siguiera aumentando la fuerza que aplicaba la máquina sobre ella; si era necesario, se detenía el ensayo para liberar los LVDT si se consideraba que

habían alcanzado su recorrido máximo y por tanto se podía poner en peligro su integridad física. Cuando se detectaba el fallo total de la probeta se detenía la marca de la máquina y se paraba la grabación por parte de los programas. El almacenamiento de los datos se realizó de forma consecutiva a la finalización de cada prueba. Así, su almacenamiento controlado aseguraba un análisis correcto y sin problemas. Los datos arrojados por ambos programas se trasladaron a una hoja de cálculo *Excel* para su posterior análisis.

Se examinó la rotura que experimentaba cada probeta (dirección, profundidad, longitud) y se tomaron imágenes para su posterior análisis que, junto con los datos numéricos, dieron el comportamiento de la piedra frente a la compresión.

Por último, sólo quedaba liberar la pieza del brazo compresor de la máquina, retirar el extensómetro con cuidado de no dañar los captadores LVDT y limpiar toda la zona de ensayo de las partículas desprendidas de la piedra al fracturarse.



## 4 Análisis de los datos

### 4.1 Relación detallada de los resultados de los ensayos

#### 4.1.1 Probeta IA

##### Ensayo dinámico

Peso: 3.314,6 g

Diámetro: 103,09 mm

Longitud: 220 mm

Temperatura de ensayo: 31,6 °C

Anotación: Se detecta un posible plano de fractura que muestra de forma evidente la no continuidad del material.

Módulo de elasticidad longitudinal:

Tabla 2. PROBETA IA. Ensayo dinámico longitudinal.

Frecuencia (Hz)	E (GPa)	LnE	$\text{LnE} - \bar{X}_{\text{LnE}}$
9.141	29,1	3,371	0,458
9.141	29,1	3,371	0,458
9.102	28,9	3,364	0,449
9.141	29,1	3,371	0,458
9.102	28,9	3,364	0,449

n	5
$\bar{X}_E$ (GPa)	<b>29,05</b>
Desviación típica	0,100
Coef. Variación	0,003
$\bar{X}_{\text{LnE}}$	2,694
Desv. típica logarítmica	0,673
Vmáximo (GPa)	29,1
Mínimo (GPa)	28,9
Valor inferior esperado	2,433
Cuantil	2,680

Módulo de elasticidad longitudinal (E) =  $29 \pm 0,1$  GPa.

Módulo de elasticidad transversal:

Tabla 3. PROBETA IA. Ensayo dinámico transversal.

Frecuencia (Hz)	E (GPa)	LnE	LnE- $\bar{X}_{LnE}$
5.703	32,3	3,475	0,000
5.703	32,3	3,475	0,000
5.703	32,3	3,475	0,000
5.703	32,3	3,475	0,000
5.703	32,3	3,475	0,000

n	5
$\bar{X}_E$ (GPa)	<b>32,3</b>
Desviación típica	0,000
Coef. Variación	0,000
$\bar{X}_{LnE}$	3,475
Desv. típica logarítmica	0,000
Vmáximo (GPa)	32,3
Mínimo (GPa)	32,3
Valor inferior esperado	32,300
Cuantil	2,460

Módulo de elasticidad transversal (G) = 32,3 GPa.

Ensayo estático:

Peso: 3.151.1g

Longitud: 208 mm

Temperatura de ensayo: 30,3 °C

Anotación: En el ensayo estático de esta probeta no se usan galgas extensométricas debido a que su plano de rotura es tan evidente que se presupone desde el comienzo que los resultados posibles a obtener no servirán para el análisis de determinación de las características mecánicas de la piedra; de modo que se evita desperdiciar esta tecnología.

Velocidad de ensayo:

$\Delta\sigma = 0,5 \pm 0,2$  MPa (según UNE – EN 14580)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon; \Delta\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l}; \Delta\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{208} \{E = 29.050 \text{ MPa}\}$$

$$0,5 = 29.050 \cdot \frac{\Delta l}{208}; \Delta l \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right) = \frac{0,5 \cdot 60 \cdot 208}{29.050} = 0,214 \text{ mm/min}$$

Carga de rotura = 1,722 MPa.

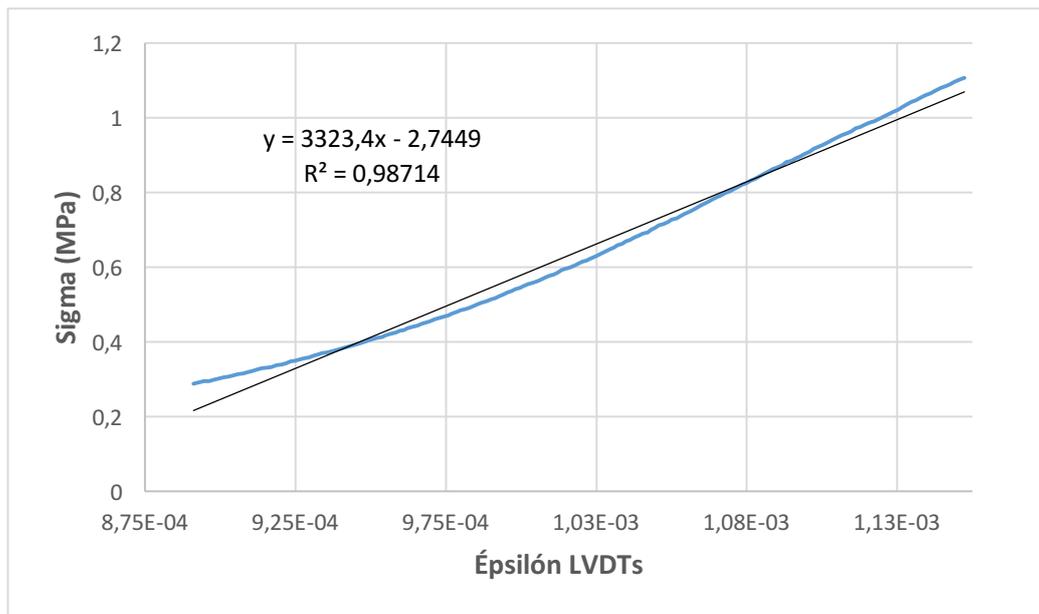


Ilustración 34. PROBETA IA. Módulo de elasticidad longitudinal con LVDT.

Módulo de elasticidad longitudinal obtenido con LVDT ( $E$ ) = 3.323,4 MPa.

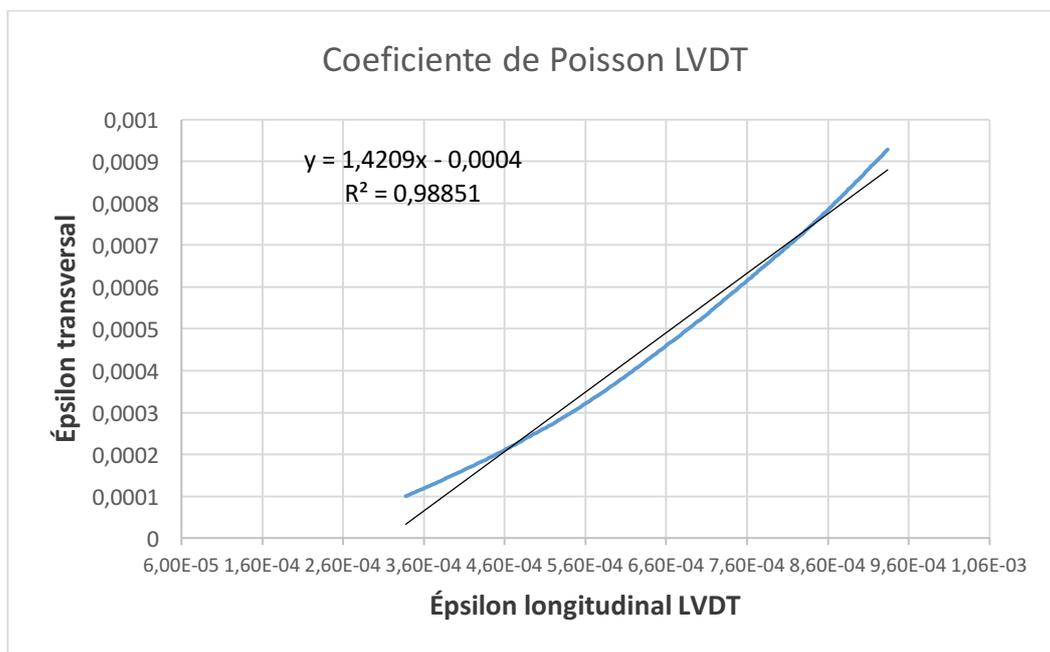


Ilustración 35. PROBETA IA. Coeficiente de Poisson con LVDT.

Coeficiente de Poisson obtenido con LVDT ( $\nu$ ) = 1,421.

Para cada probeta se calcula la densidad aparente con las dimensiones y peso originales y tras ser retocadas para el ensayo estático.

$$\gamma_{ap} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{\text{peso}}{\text{longitud} \cdot \text{sección}} = \frac{\text{peso}}{\text{longitud} \cdot \pi \cdot \left(\frac{\text{diámetro}}{2}\right)^2} \quad (7)$$

Haciendo uso de la ecuación (7) se obtiene la densidad aparente para cada probeta, introduciendo los datos correspondientes, en cada caso, de peso, longitud y diámetro.

Tabla 4. PROBETA IA. Densidad aparente para las dimensiones originales y tras ser retocada.

	Original	Retocada
Peso (g)	3.314,6	3.151,1
Longitud (mm)	220	208
Diámetro medio (mm)	103,09	103,09
<b>Densidad aparente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2.000</b>	<b>2.000</b>



Ilustración 36. Rotura de probeta IA.

Como se predijo, la probeta IA rompe por el claro plano de rotura que se distinguía desde su recepción; haciendo inválidos para el análisis los resultados obtenidos en su ensayo.

#### 4.1.2 Probeta IB

##### Ensayo dinámico

Peso: 3.404,3 g

Diámetro: 103,16 mm

Longitud: 218 mm

Temperatura de ensayo: 31,5 °C

Módulo de elasticidad longitudinal:

Tabla 5. PROBETA IB. Ensayo dinámico longitudinal.

Frecuencia (Hz)	E (GPa)	LnE	LnE- $\bar{X}_{LnE}$
6.523	15,4	2,734	0,000
6.523	15,4	2,734	0,000
6.523	15,4	2,734	0,000
6.523	15,4	2,734	0,000
6.523	15,4	2,734	0,000

n	5
$\bar{X}_E$ (GPa)	<b>15,4</b>
Desviación típica	0,000
Coef. Variación	0,000
$\bar{X}_{LnE}$	2,734
Desv. típica logarítmica	0,000
Vmáximo (GPa)	15,4
Mínimo (GPa)	15,4
Valor inferior esperado	15,400
Cuantil	2,460

Módulo de elasticidad longitudinal (E) = 15,4 GPa.

Módulo de elasticidad transversal:

Tabla 6. PROBETA IB. Ensayo dinámico transversal.

Frecuencia (Hz)	E (GPa)	LnE	LnE- $\bar{X}_{LnE}$
3.633	13,7	2,617	0,000
3.633	13,7	2,617	0,000
3.633	13,7	2,617	0,000
3.633	13,7	2,617	0,000
3.633	13,7	2,617	0,000

n	5
$\bar{X}_E$ (GPa)	<b>13,7</b>
Desviación típica	0,000
Coef. Variación	0,000
$\bar{X}_{LnE}$	2,617
Desv. típica logarítmica	0,000
Vmáximo (GPa)	13,7
Mínimo (GPa)	13,7
Valor inferior esperado	13,700
Cuantil	2,460

Módulo de elasticidad transversal (G) =13,7 GPa.

Ensayo estático:

Peso: 3.247,0 g

Longitud: 206 mm

Temperatura de ensayo: 30,1 °C

Velocidad de ensayo:

$\Delta\sigma = 0,5 \pm 0,2$  MPa (según UNE – EN 14580)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon; \Delta\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l}; \Delta\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{206} \quad \{E = 15.400 \text{ MPa}\}$$

$$0,5 = 15.400 \cdot \frac{\Delta l}{206}; \Delta l \left( \frac{\text{mm}}{\text{min}} \right) = \frac{0,5 \cdot 60 \cdot 206}{15.400} = 0,401 \text{ mm/min}$$

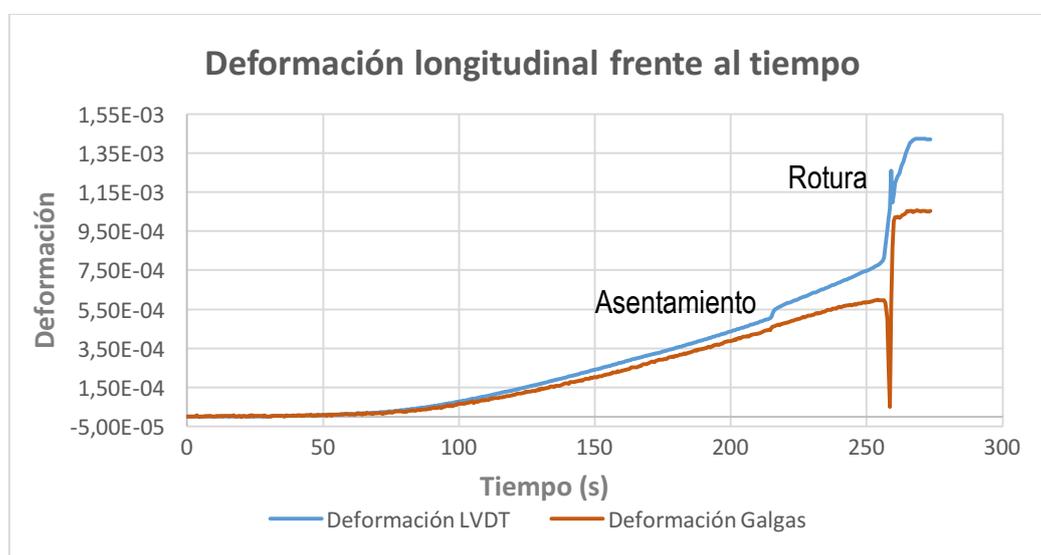


Ilustración 37. PROBETA IB. Gráfica comparativa entre deformación obtenida con LVDT y con galga.

La gráfica mostrada en la Ilustración 37 representa la deformación media adquirida por las dos tecnologías utilizadas, LVDT y galgas extensiométricas, durante el tiempo del ensayo. Resulta un método de comparación visual para observar la adquisición de las dos tecnologías. Se observa su alta similitud hasta el momento en el que se produce un asentamiento de la piedra, aproximadamente a los 220 segundos; tras lo cual se produce la rotura de la muestras que se evidencia por el pico que ambos dispositivos recogen para un tiempo de 260 segundos.

Carga de rotura = 7,330 MPa.

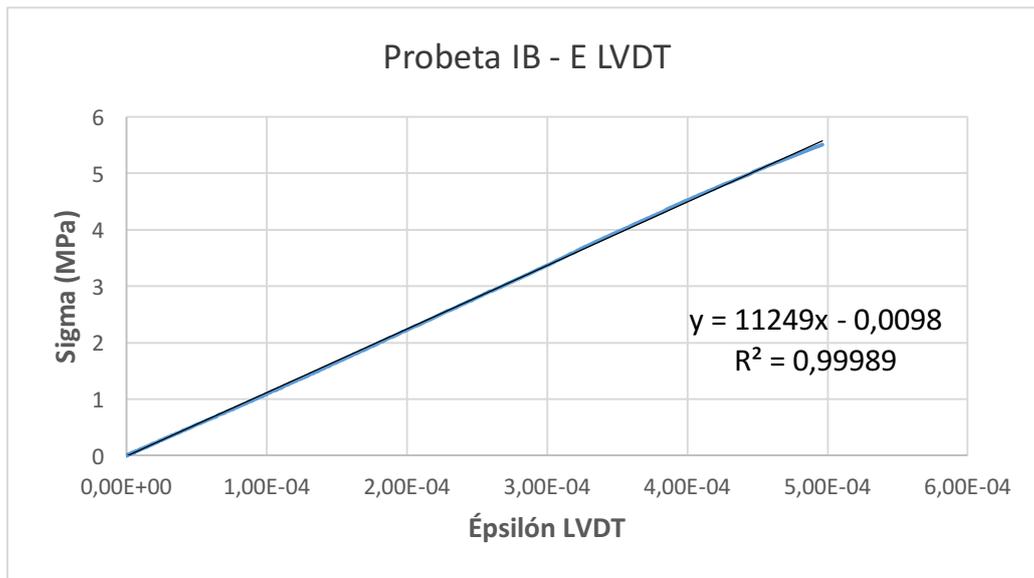


Ilustración 38. PROBETA IB. Módulo de elasticidad obtenido con LVDT.

Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante LVDT (E) = 11.249 MPa.

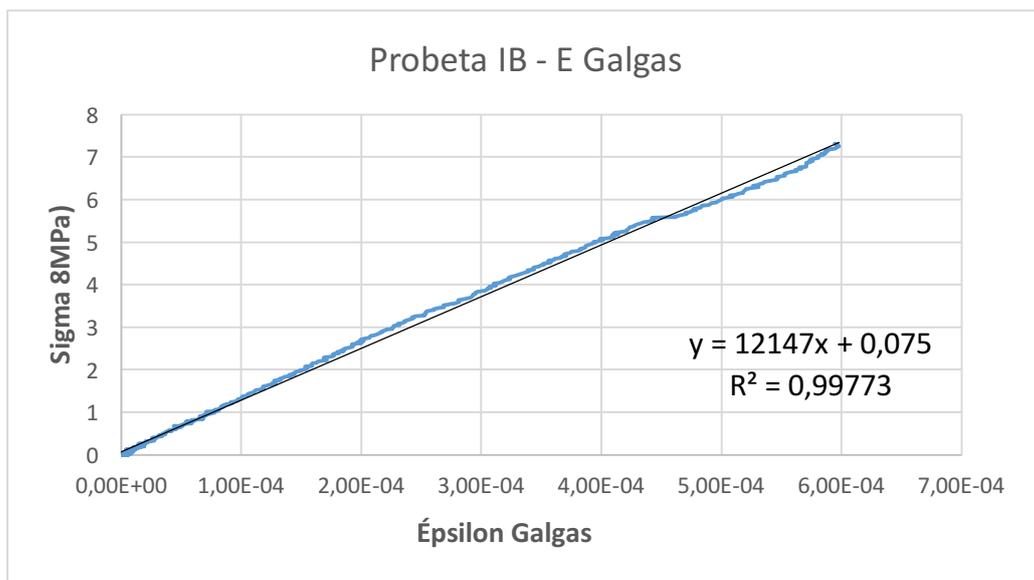


Ilustración 39. PROBETA IB. Módulo de elasticidad obtenido con galgas.

Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante galgas extensométricas (E) = 12.147 MPa.

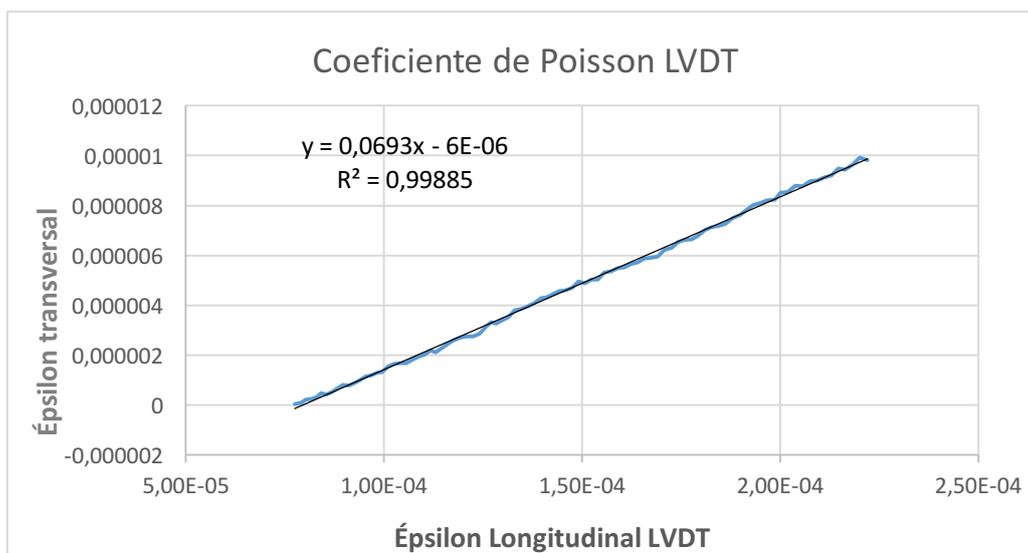


Ilustración 40. PROBETA IB. Coeficiente de Poisson obtenido mediante LVDT.

Coeficiente de Poisson obtenido mediante LVDT ( $\nu$ ) = 0,069.

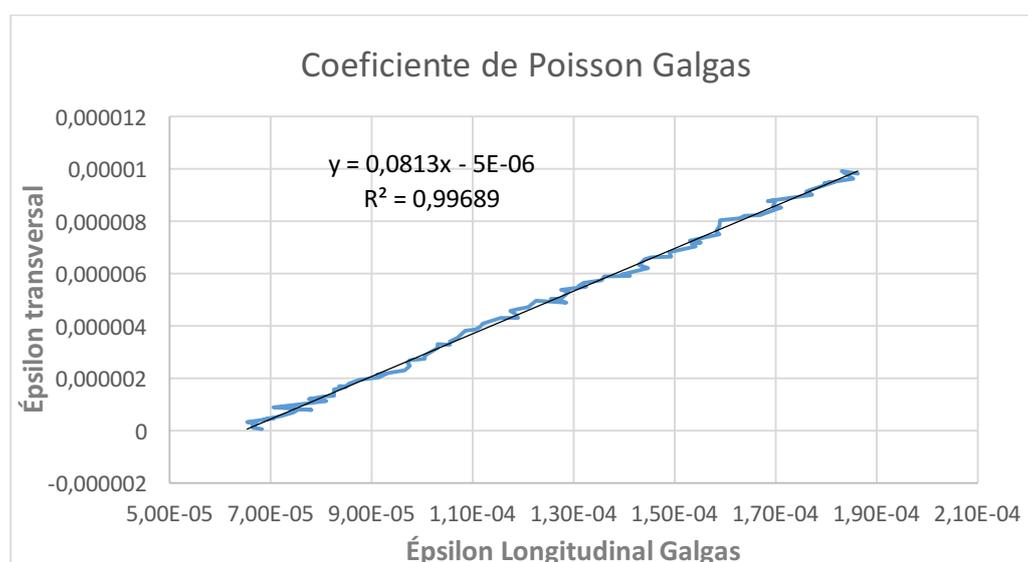


Ilustración 41. PROBETA IB. Coeficiente de Poisson medido mediante galgas.

Coeficiente de Poisson obtenido mediante galgas extensométricas ( $\nu$ ) = 0,1176.

Tabla 7. PROBETA IB. Densidad aparente para las dimensiones originales y tras ser retocadas.

	Original	Retocada
Peso (g)	3404,3	3247
Longitud (mm)	218	206
Diámetro medio (mm)	103,16	103,16
<b>Densidad aparente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1.881,339</b>	<b>1.898,938</b>

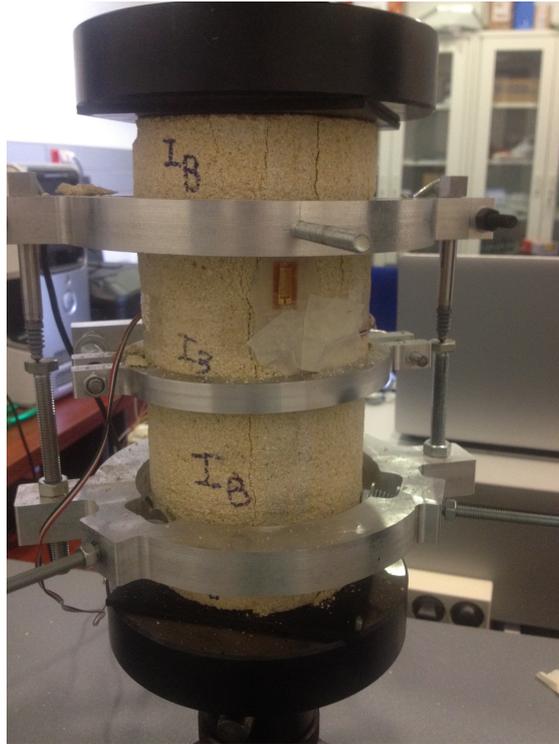


Ilustración 42. Rotura de probeta IB.

Se observa una clara rotura a lo largo del eje longitudinal de la probeta.

#### 4.1.3 *Probeta IIA*

##### Ensayo dinámico

Peso: 3.356,4 g

Diámetro: 102,81 mm

Longitud: 217 mm

Temperatura de ensayo: 32,3 °C

Módulo de elasticidad longitudinal:

Tabla 8. PROBETA IIA. Ensayo dinámico longitudinal.

Frecuencia (Hz)	E (GPa)	LnE	LnE- $\bar{X}_{LnE}$
6.719	15,8	2,760	0,000
6.719	15,8	2,760	0,000
6.719	15,8	2,760	0,000
6.719	15,8	2,760	0,000
6.719	15,8	2,760	0,000

n	5
$\bar{X}_E$ (GPa)	<b>15,8</b>
Desviación típica	0,000
Coef. Variación	0,000
$\bar{X}_{LnE}$	2,760
Desv. típica logarítmica	0,000
Vmáximo (GPa)	15,8
Mínimo (GPa)	15,8
Valor inferior esperado	15,800
Cuantil	2,460

Módulo de elasticidad longitudinal (E) = 15,8 GPa.

Módulo de elasticidad transversal:

Tabla 9. PROBETA IIA. Ensayo dinámico transversal.

Frecuencia (Hz)	E (GPa)	LnE	LnE- $\bar{X}_{LnE}$
3.984	15,8	2,760	0,004
3.984	15,8	2,760	0,004
3.945	15,5	2,741	-0,015
3.984	15,8	2,760	0,004
3.984	15,8	2,760	0,004

n	5
$\bar{X}_E$ (GPa)	<b>15,74</b>
Desviación típica	0,134
Coef. Variación	0,009
$\bar{X}_{LnE}$	2,756
Desv. típica logarítmica	0,000
Vmáximo (GPa)	15,8
Mínimo (GPa)	15,5
Valor inferior esperado	15,740
Cuantil	2,460

Módulo de elasticidad transversal (G) = 15,7 ± 0,1 GPa.

Ensayo estático:

Peso: 3.160,3 g

Longitud: 209 mm

Temperatura de ensayo: 29,8 °C

Velocidad de ensayo:

$$\Delta\sigma = 0,5 \pm 0,2 \text{ MPa (según UNE – EN 14580)}$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon; \Delta\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l}; \Delta\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{209} \{E = 15.800 \text{ MPa}\}$$

$$0,5 = 15.800 \cdot \frac{\Delta l}{209}; \Delta l \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right) = \frac{0,5 \cdot 60 \cdot 209}{15.800} = 0,397 \text{ mm/min}$$

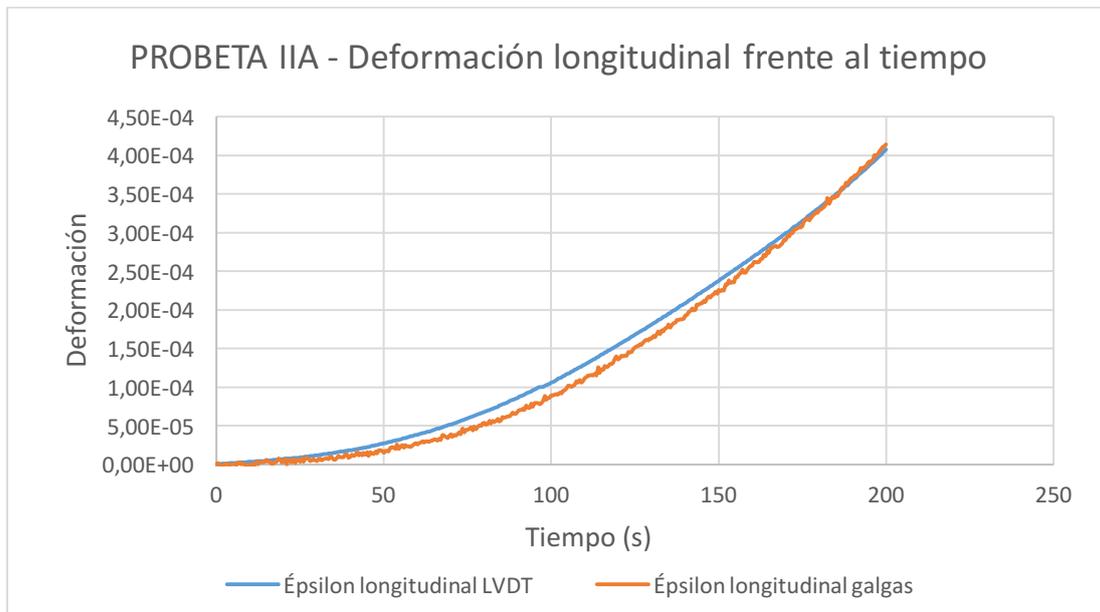


Ilustración 43. PROBETA IIA. Gráfica comparativa entre deformación medida con LVDT y con galga.

Carga de rotura = 5,448 MPa.

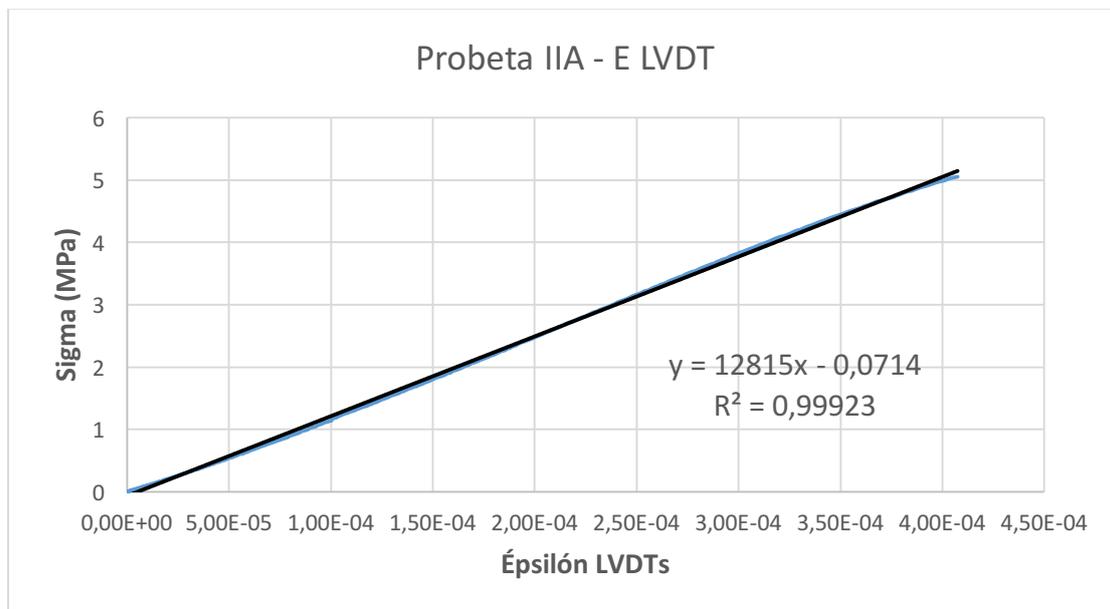


Ilustración 44. PROBETA IIA. Módulo de elasticidad longitudinal medido mediante LVDT.

Módulo de elasticidad longitudinal medido mediante LVDT (E) = 12.815 MPa.

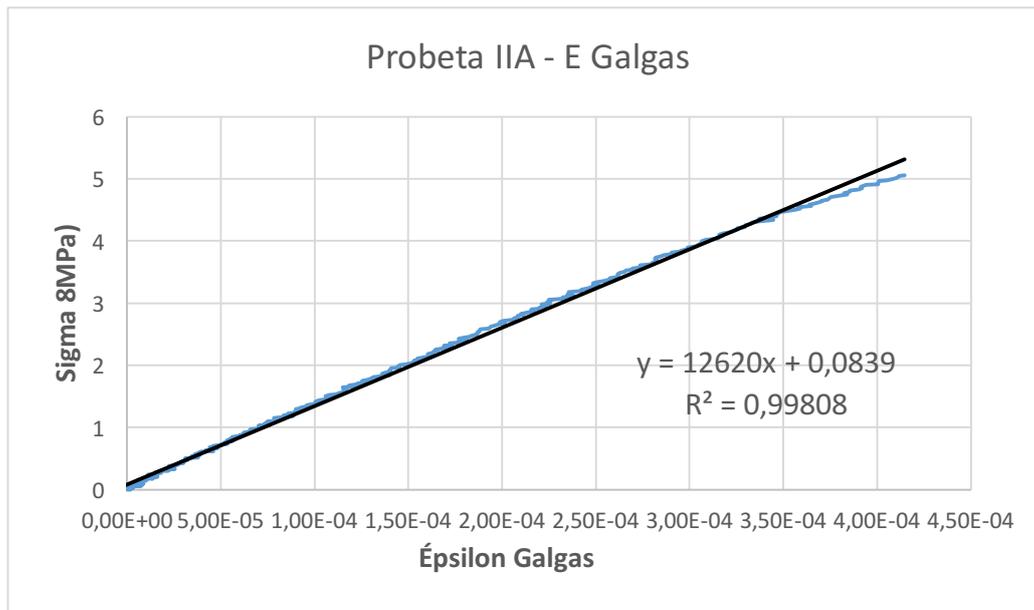


Ilustración 45. PROBETA IIA. Módulo de elasticidad longitudinal medido mediante galga.

Módulo de elasticidad medido mediante galgas extensométricas ( $E$ ) = 12.620 MPa.

En este ensayo el sensor transversal no obtuvo lectura hasta que se produjo la rotura de la pieza, por tanto la obtención del coeficiente de Poisson se hace innecesaria debido a su total carencia de utilidad.

Tabla 10. PROBETA IIA. Densidad aparente para las dimensiones originales y tras ser retocada.

	Original	Retocada
Peso	3.356,4	3.160,3
Longitud	217	209
Diámetro medio (mm)	102,81	102,81
<b>Densidad aparente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1.863,053</b>	<b>1.821,349</b>

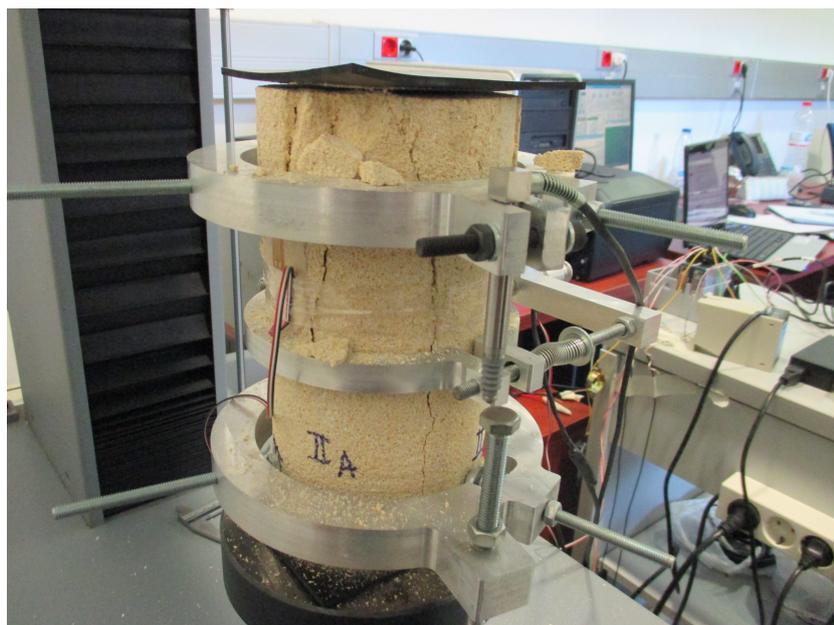


Ilustración 46. Rotura de probeta IIA.

Se observa una clara rotura en la dirección del eje longitudinal de la probeta.

#### 4.1.4 Probeta IIB

Ensayo dinámico:

Peso: 3.281,2 g

Diámetro: 102,83 mm

Longitud: 219 mm

Temperatura de ensayo: 32,3 °C

Módulo de elasticidad longitudinal:

Tabla 11. PROBETA IIB. Ensayo dinámico longitudinal.

Frecuencia (Hz)	E (GPa)	LnE	LnE- $\bar{X}_{LnE}$
4.453	6,8	1,917	0,000
4.492	6,9	1,932	0,000
4.492	6,9	1,932	0,000
4.492	6,9	1,932	0,000
4.492	6,9	1,932	0,000

n	5
$\bar{X}_E$ (Gpa)	<b>6,88</b>
Desviación típica	0,045
Coef. Variación	0,007
$\bar{X}_{LnE}$	1,929
Desv. típica logarítmica	0,007
Vmáximo (Gpa)	6,9
Mínimo (Gpa)	6,8
Valor inferior esperado	6,770
Cuantil	2,460

Módulo de elasticidad longitudinal (E) = 6,9 ± 0,04 GPa.

Módulo de elasticidad transversal:

Tabla 12. PROBETA IIB. Ensayo dinámico transversal.

Frecuencia (Hz)	E (GPa)	LnE	LnE- $\bar{X}_{LnE}$
2.617	6,7	1,902	0,018
2.578	6,5	1,872	-0,012
2.578	6,5	1,872	-0,012
2.578	6,5	1,872	-0,012
2.617	6,7	1,902	0,018

n	5
$\bar{X}_E$ (Gpa)	<b>6,58</b>
Desviación típica	0,110
Coef. Variación	0,017
$\bar{X}_{LnE}$	1,884
Desv. típica logarítmica	0,000
Vmáximo (Gpa)	6,7
Mínimo (Gpa)	6,5
Valor inferior esperado	6,579
Cuantil	2,460

Módulo de elasticidad transversal (G) =  $6,6 \pm 0,1$  GPa.

Ensayo estático:

Peso: 3.159,4 g

Longitud: 209 mm

Temperatura de ensayo: 28,9 °C

Velocidad de ensayo:

$\Delta\sigma = 0,5 \pm 0,2$  MPa (según UNE – EN 14580)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon; \Delta\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l}; \Delta\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{209} \{E = 6.880 \text{ MPa}\}$$

$$0,5 = 6.880 \cdot \frac{\Delta l}{209}; \Delta l \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right) = \frac{0,5 \cdot 60 \cdot 209}{6.880} = 0,911 \text{ mm/min}$$

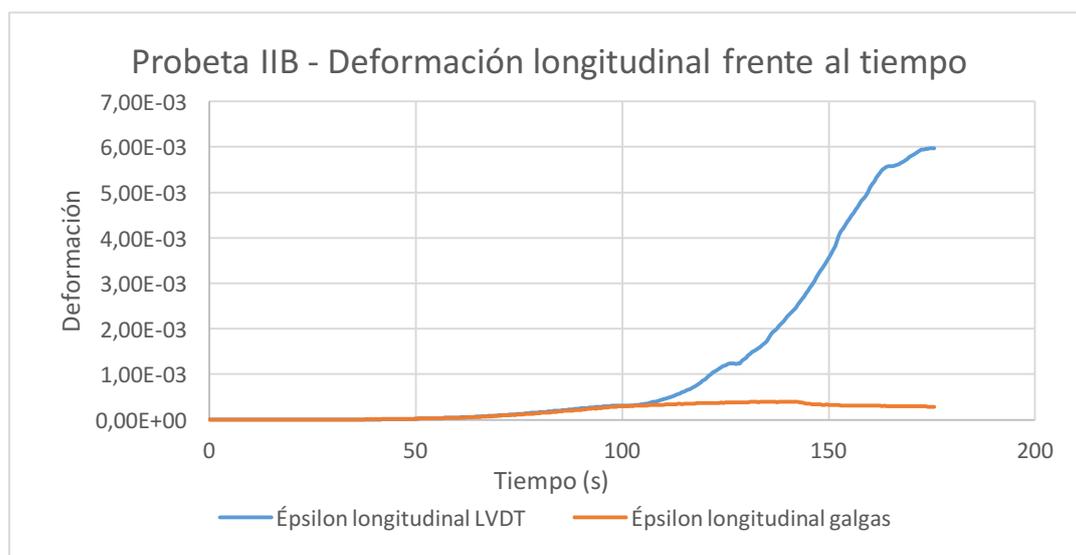


Ilustración 47. PROBETA IIB. Gráfica comparativa entre deformación medida con LVDT y con galga.

La gráfica mostrada por la Ilustración 47 manifiesta claramente la importancia de utilizar galgas de longitud igual o superior al diámetro de la probeta. En este ensayo la rotura se produjo en la base inferior de la muestra de modo que quedaba alejada del área de medida que eran capaces de captar las galgas, no obstante sí lo fue para los LVDT. En la imagen se puede ver que a partir de los 105 segundos comienza a romper la probeta mientras que para las galgas resulta casi imperceptible.

Carga de rotura = 2,752 MPa.

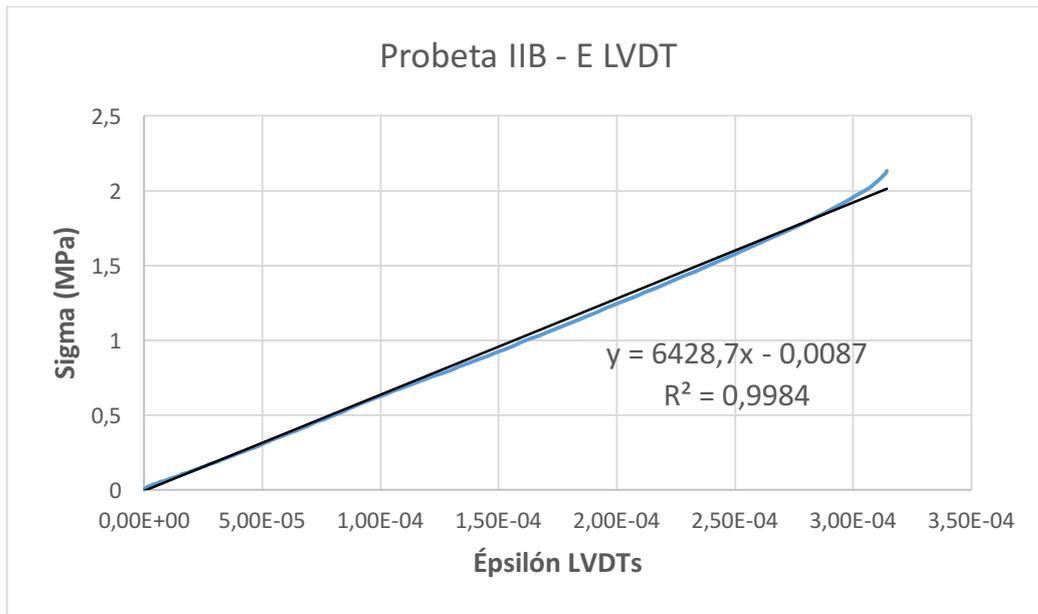


Ilustración 48. PROBETA IIB. Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante LVDT.

Módulo de elasticidad obtenido mediante LVDT (E) = 6.248,7 MPa.

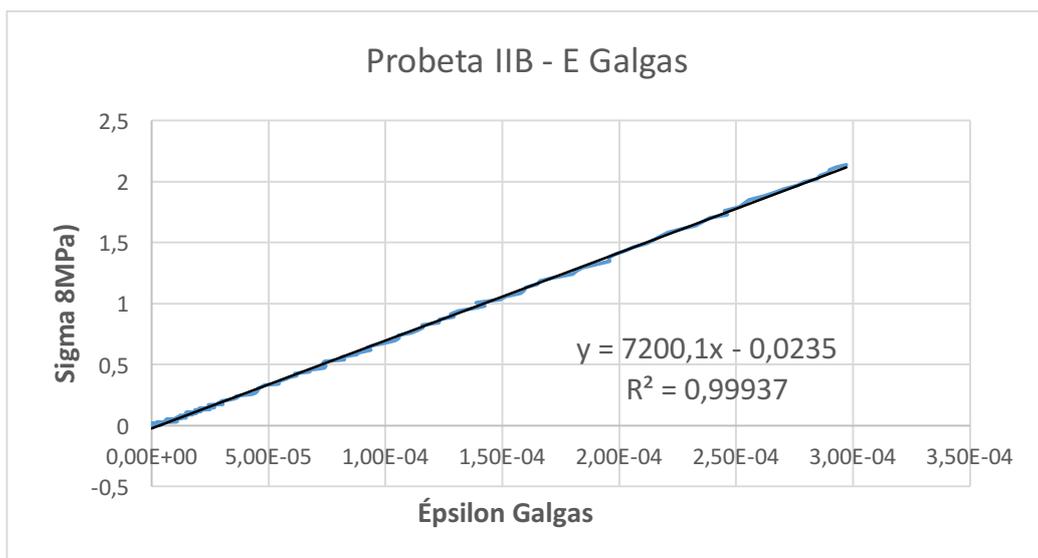


Ilustración 49. PROBETA IIB. Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante galga.

Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante galgas extensométricas (E) = 7.200 MPa.

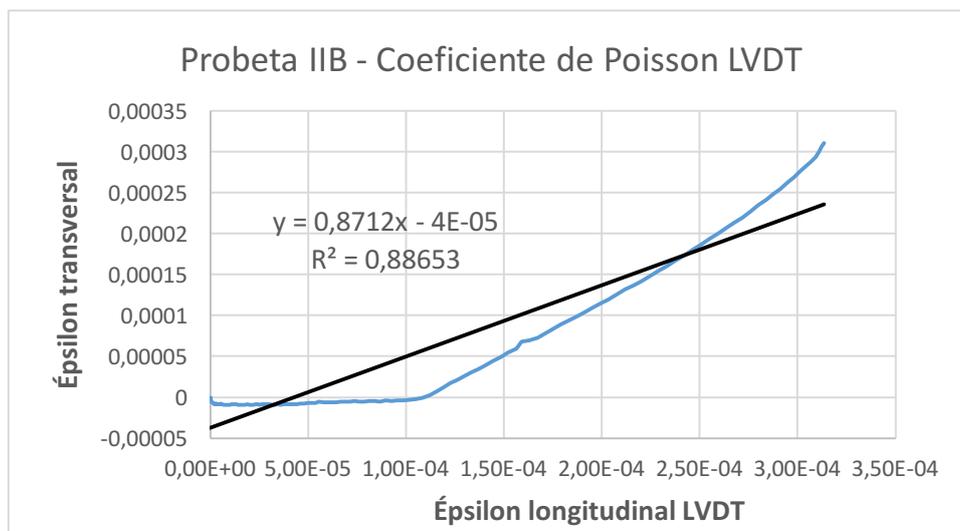


Ilustración 50. PROBETA IIB. Coeficiente de Poisson obtenido mediante LVDT.

Coeficiente de Poisson obtenido mediante LVDT ( $\nu$ ) = 0,871.

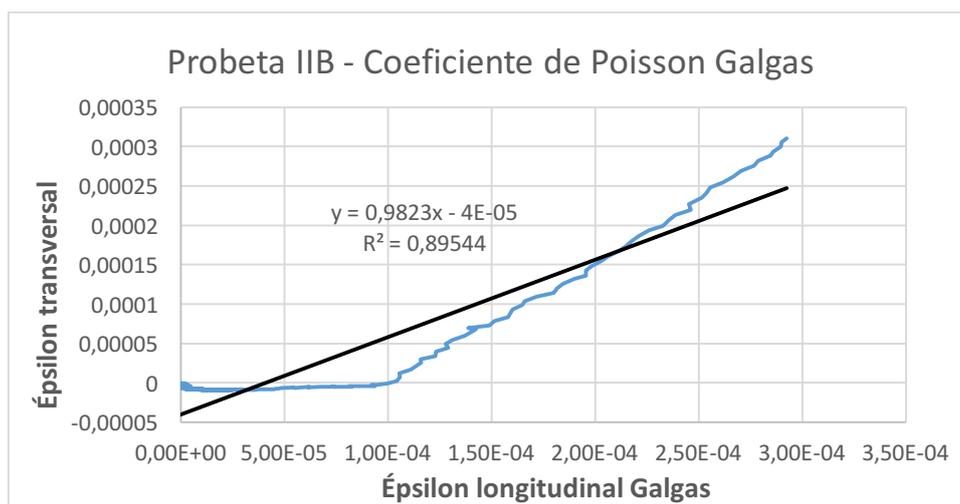


Ilustración 51. PROBETA IIB. Coeficiente de Poisson obtenido mediante galga.

Coeficiente de Poisson obtenido mediante galgas extensométricas ( $\nu$ ) = 0,9823.-

Tabla 13. PROBETA IIB. Densidad aparente para las dimensiones originales y tras ser retocada.

	Original	Retocada
Peso (g)	3281,2	3159,4
Longitud (mm)	219	209
Diámetro medio (mm)	102,83	102,83
<b>Densidad aparente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1.804,093</b>	<b>1.820,241</b>

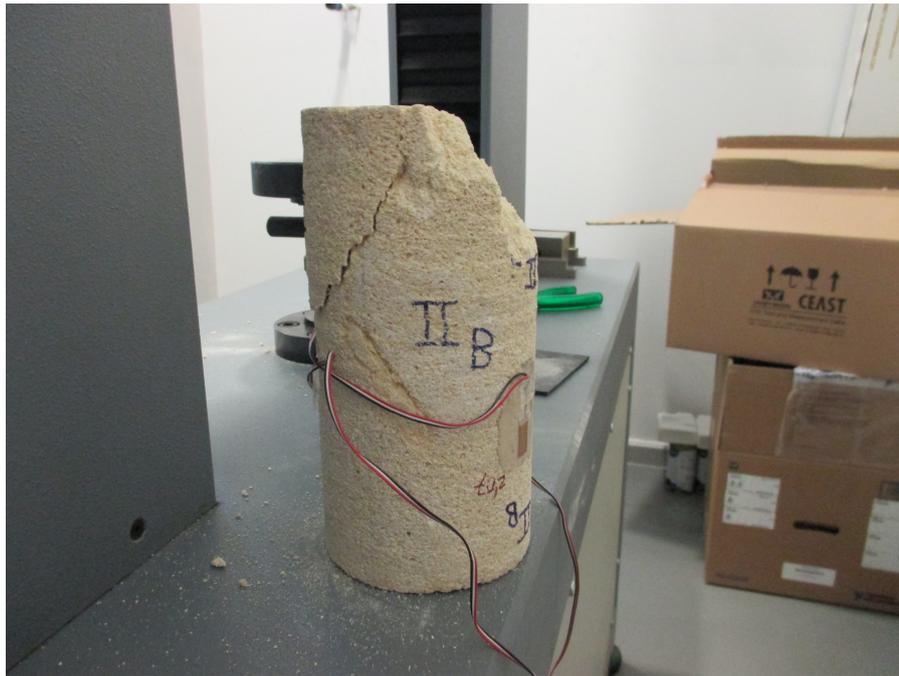


Ilustración 52. Rotura de la probeta IIB.

Se observan dos planos de rotura con una inclinación aproximada de  $45^\circ$ , sin verse afectados por la incisión que en esa misma cara se muestra, que a comienzos del ensayo se consideró posible punto de concentración de tensiones, y , por consiguiente, un posible punto de rotura.

#### 4.1.5 Probeta IIIA

Ensayo dinámico:

Peso: 3.278 g

Diámetro: 102,5 mm

Longitud: 219 mm

Temperatura de ensayo:  $32,3^\circ\text{C}$

Módulo de elasticidad longitudinal:

Tabla 14. PROBETA IIIA. Ensayo dinámico longitudinal.

Frecuencia (Hz)	E (GPa)	LnE	$\text{LnE} - \bar{X}_{\text{LnE}}$
4.688	7,5	2,015	0,000
4.688	7,5	2,015	0,000
4.648	7,4	2,001	0,000
4.688	7,5	2,015	0,000
4.688	7,5	2,015	0,000

n	5
$\bar{X}_E$ (Gpa)	<b>7,48</b>
Desviación típica	0,045
Coef. Variación	0,006
$\bar{X}_{LnE}$	2,012
Desv. típica logarítmica	0,006
Vmáximo (Gpa)	7,5
Mínimo (Gpa)	7,4
Valor inferior esperado	7,370
Cuantil	2,460

Módulo de elasticidad longitudinal (E) =  $7,5 \pm 0,04$  GPa.

Módulo de elasticidad transversal:

Tabla 15. PROBETA IIIA. Ensayo dinámico transversal.

Frecuencia (Hz)	E (GPa)	LnE	LnE- $\bar{X}_{LnE}$
2.773	7,6	2,028	0,000
2.773	7,6	2,028	0,000
2.773	7,6	2,028	0,000
2.773	7,6	2,028	0,000
2.773	7,6	2,028	0,000

n	5
$\bar{X}_E$ (Gpa)	<b>7,6</b>
Desviación típica	0,000
Coef. Variación	0,000
$\bar{X}_{LnE}$	2,028
Desv. típica logarítmica	0,000
Vmáximo (Gpa)	7,6
Mínimo (Gpa)	7,6
Valor inferior esperado	7,600
Cuantil	2,460

Módulo de elasticidad transversal (G) = 7,6 GPa.

Ensayo estático:

Peso: 3.124,0 g

Longitud: 207 mm

Temperatura de ensayo: 30,1 °C

Velocidad de ensayo:

$$\Delta\sigma = 0,5 \pm 0,2 \text{ MPa (según UNE – EN 14580)}$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon; \Delta\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l}; \Delta\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{207} \{E = 7.480 \text{ MPa}\}$$

$$0,5 = 7.480 \cdot \frac{\Delta l}{207}; \Delta l \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right) = \frac{0,5 \cdot 60 \cdot 207}{7.480} = 0,830 \text{ mm/min}$$

Carga de rotura = 3,563 MPa.

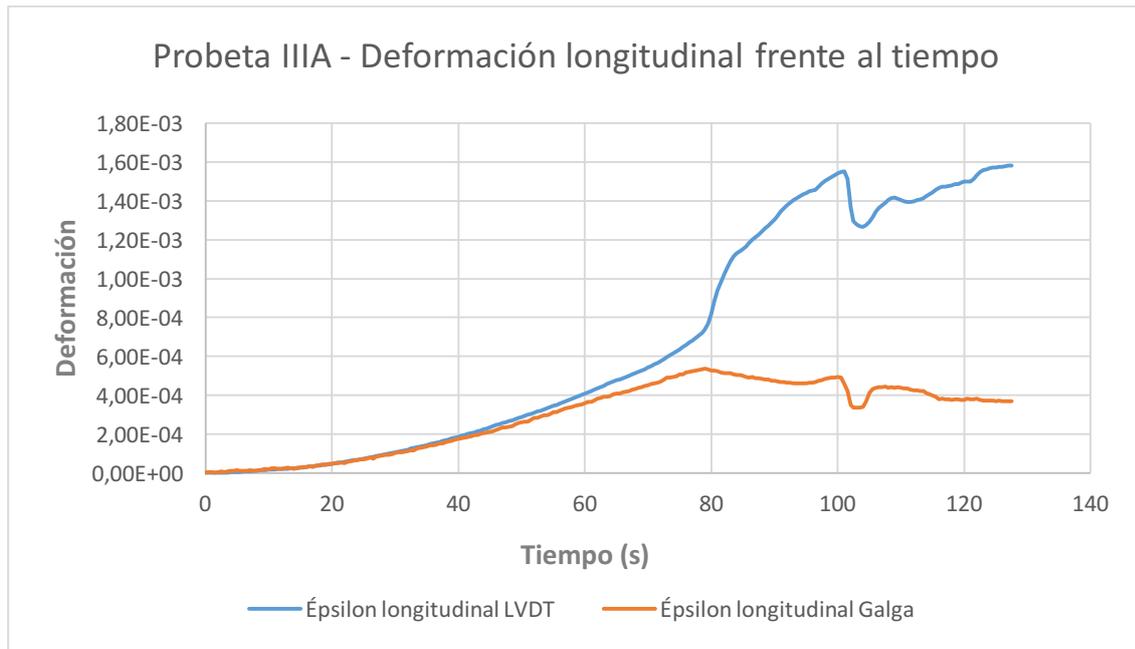


Ilustración 53. PROBETA IIIA. Gráfica comparativa entre deformación obtenida con LVDT y con galga.

En este gráfico podemos ver de nuevo la influencia de la longitud de las galgas en la captación real de la deformación sufrida por la probeta. Como se verá más adelante la rotura de esta muestra se produce alejada de las galgas, de modo que la influencia de las grietas es casi imperceptible para esta tecnología, al contrario que para los LVDT que, al abarcar una longitud de medición mayor al diámetro de la probeta, sí se ven perturbados por la rotura y diferentes asentamientos que pueda sufrir la piedra.

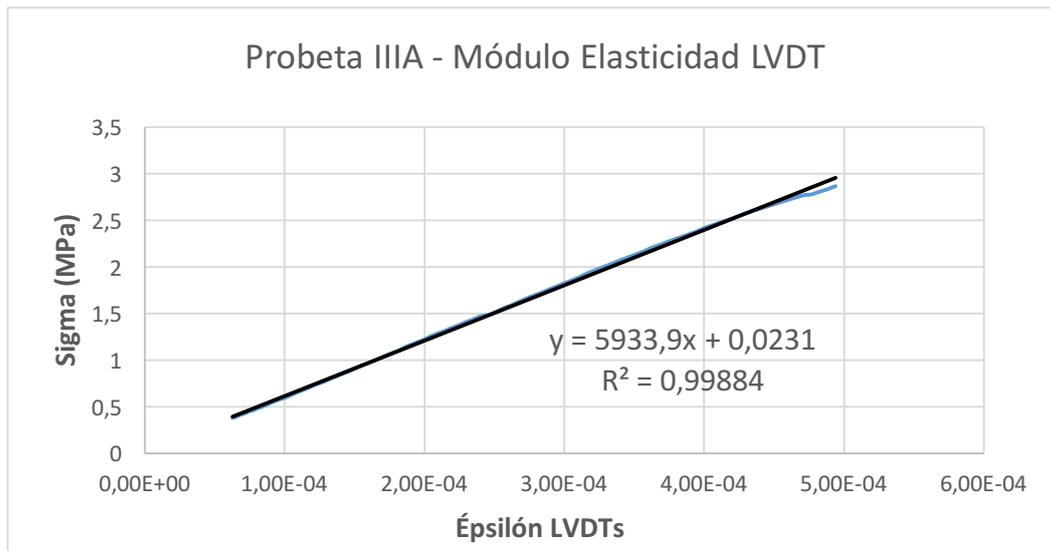


Ilustración 54. PROBETA IIIA. Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante LVDT.

Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante LVDT (E) = 5.933,9 MPa.

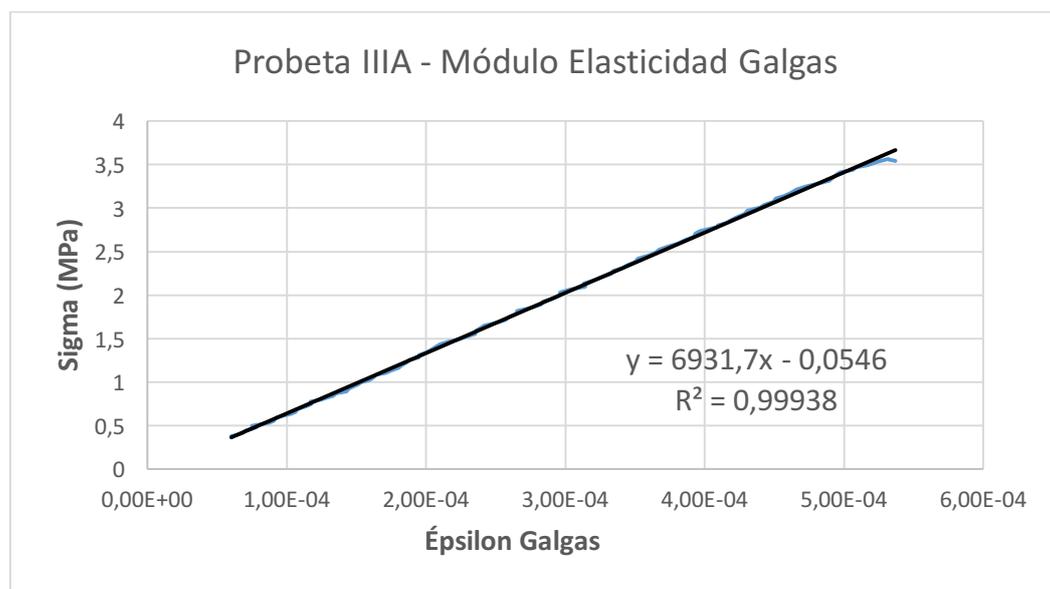


Ilustración 55. PROBETA IIIA. Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante galga.

Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante galgas extensométricas (E) = 6.931,7 MPa.

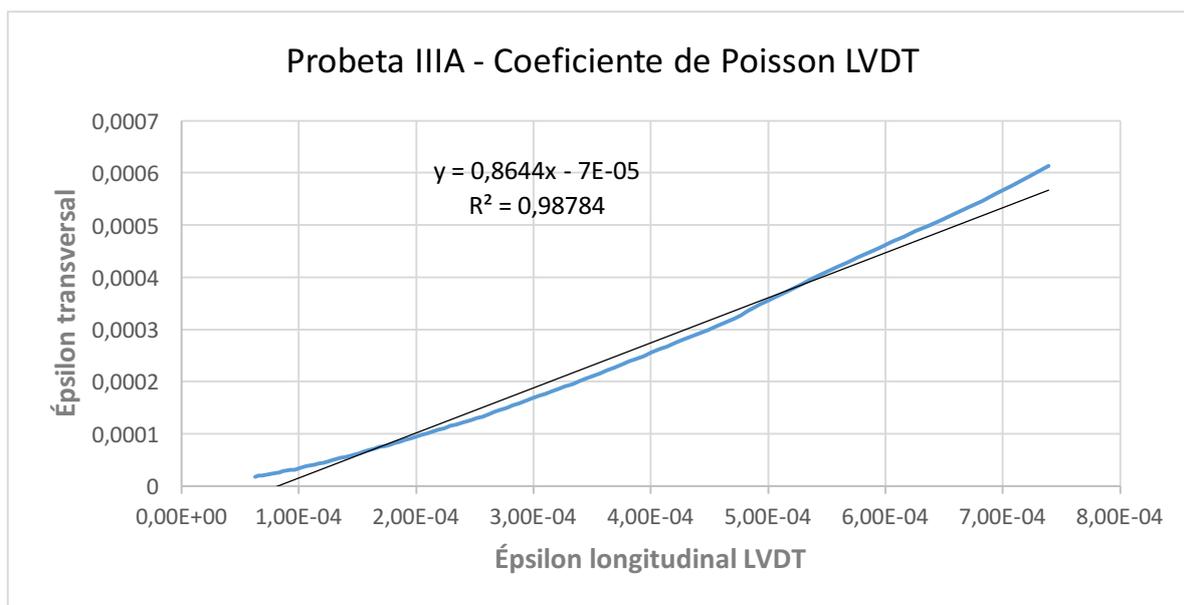


Ilustración 56. PROBETA IIIA. Coeficiente de Poisson obtenido mediante LVDT.

Coeficiente de Poisson obtenido mediante LVDT ( $\nu$ ) = 0,864.

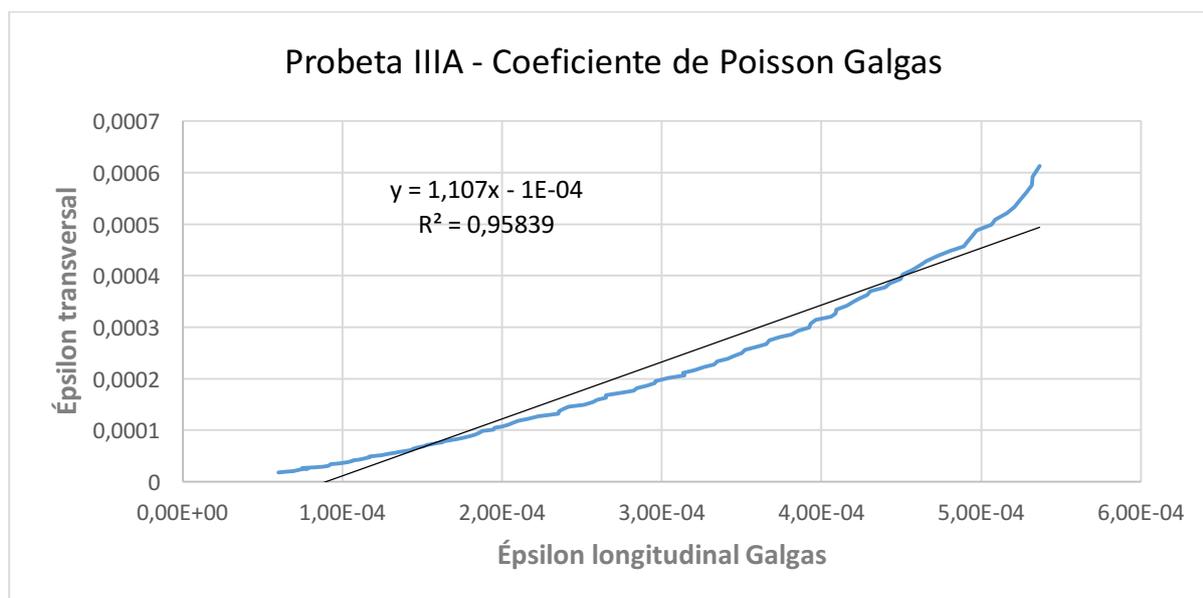


Ilustración 57. PROBETA IIIA. Coeficiente de Poisson obtenido mediante galga.

Coeficiente de Poisson obtenido mediante galgas extensométricas ( $\nu$ ) = 1,107

Tabla 16. PROBETA IIIA. Densidad aparente para las dimensiones originales y tras ser retocada.

	Original	Retocada
Peso (g)	3.278	3.124
Longitud (mm)	219	207
Diámetro medio (mm)	102,5	102,5
<b>Densidad aparente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1.814,076</b>	<b>1.829,074</b>

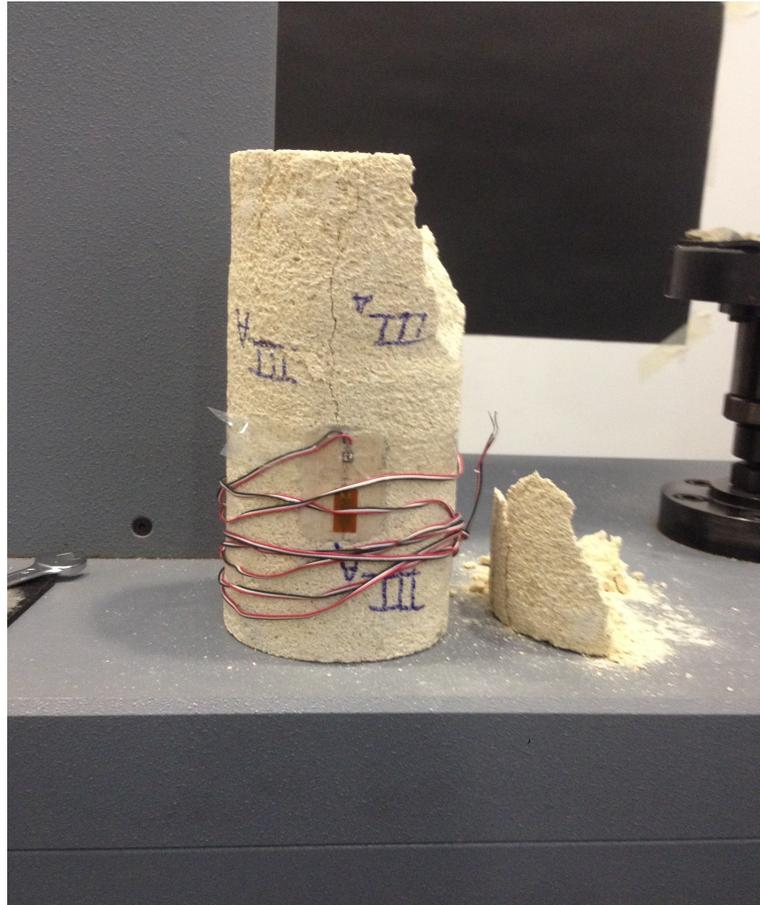


Ilustración 58. Rotura de probeta IIIA.

Se produce una rotura en la dirección del eje longitudinal de la probeta con algunos planos de rotura inclinados con respecto a este eje.

#### 4.1.6 *Probeta IIIB*

Ensayo dinámico:

Peso: 3.511,4g

Diámetro: 103,16 mm

Longitud: 219 mm

Temperatura de ensayo: 31 °C

Módulo de elasticidad longitudinal:

Tabla 17. PROBETA IIIB. Ensayo dinámico longitudinal.

Frecuencia (Hz)	E (GPa)	LnE	LnE- $\bar{X}_{LnE}$
6.914	17,6	2,868	0,000
6.953	17,8	2,879	0,000
6.953	17,8	2,879	0,000
6.914	17,6	2,868	0,000
6.953	17,8	2,879	0,000

n	5
$\bar{X}_E$ (Gpa)	<b>17,72</b>
Desviación típica	0,110
Coef. Variación	0,006
$\bar{X}_{LnE}$	2,875
Desv. típica logarítmica	0,006
Vmáximo (Gpa)	17,8
Mínimo (Gpa)	17,6
Valor inferior esperado	17,452
Cuantil	2,460

Módulo de elasticidad longitudinal (E) =  $17,7 \pm 0,1$  GPa.

Módulo de elasticidad transversal:

Tabla 18. PROBETA IIIB. Ensayo dinámico transversal.

Frecuencia (Hz)	E (GPa)	LnE	LnE- $\bar{X}_{LnE}$
3.984	16,6	2,809	0,000
3.984	16,6	2,809	0,000
3.984	16,6	2,809	0,000
3.984	16,6	2,809	0,000
3.984	16,6	2,809	0,000

n	5
$\bar{X}_E$ (Gpa)	<b>16,6</b>
Desviación típica	0,000
Coef. Variación	0,000
$\bar{X}_{LnE}$	2,809
Desv. típica logarítmica	0,000
Vmáximo (Gpa)	16,6
Mínimo (Gpa)	16,6
Valor inferior esperado	16,600
Cuantil	2,460

Módulo de elasticidad transversal (G) = 16 GPa.

Ensayo estático:

Peso: 3.317,7 g

Longitud: 208 mm

Temperatura de ensayo: 29,2 °C

Velocidad de ensayo:

$\Delta\sigma = 0,5 \pm 0,2$  MPa (según UNE – EN 14580)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon; \Delta\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l}; \Delta\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{208} \{E = 17.720 \text{ MPa}\}$$

$$0,5 = 17.720 \cdot \frac{\Delta l}{208}; \Delta l \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right) = \frac{0,5 \cdot 60 \cdot 208}{17.720} = 0,141 \text{ mm/min}$$

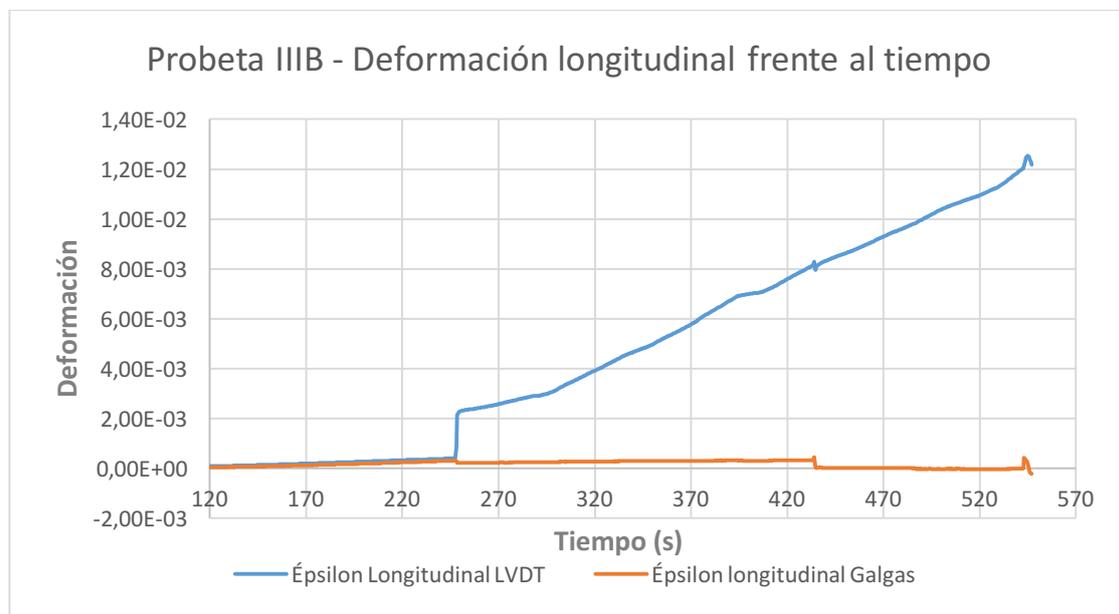


Ilustración 59. PROBETA IIIB. Gráfica comparativa entre deformación obtenida con LVDT y galga.

La enorme diferencia que se observa entre las dos curvas se debe a la forma de la rotura que, como se puede ver, se produjo en torno al segundo 250. Así mismo, esta diferencia entre las curvas vuelve a ser causada por las distintas longitudes de medida que abarca cada tecnología, quedando nuevamente demostrado la fiabilidad de la medición con LVDT.

Carga de rotura = 6,054 MPa.

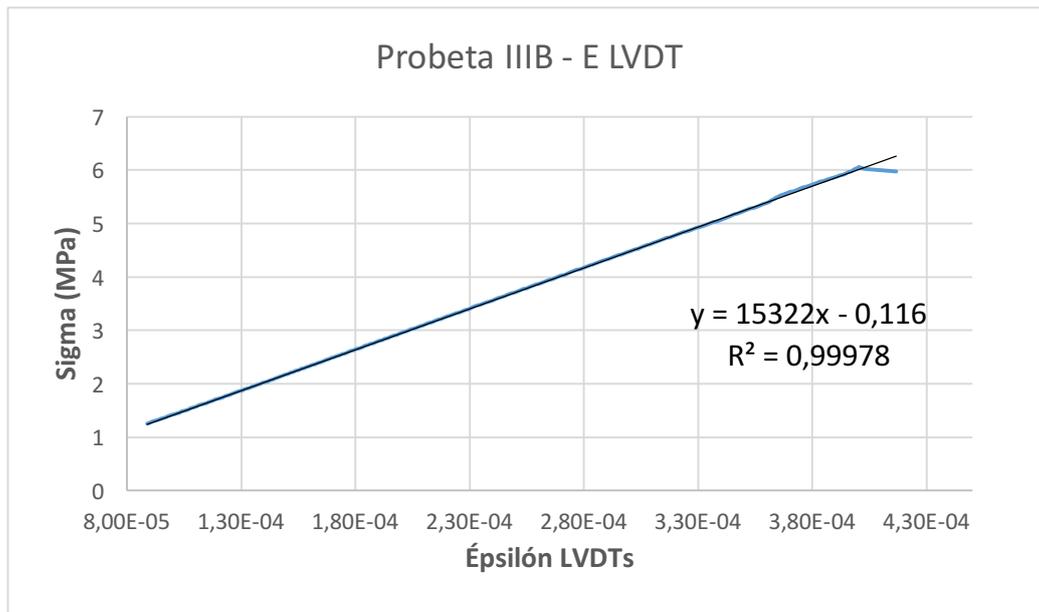


Ilustración 60. PROBETA IIB. Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante LVDT.

Módulo de elasticidad obtenido mediante LVDT (E) = 15.322 MPa.

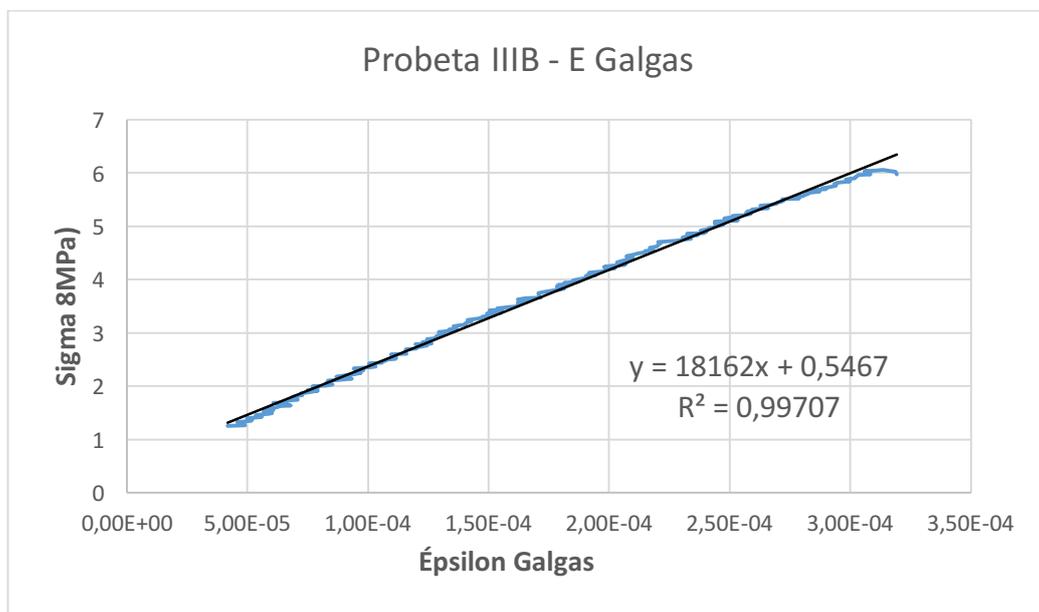


Ilustración 61. PROBETA IIB. Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante galga.

Módulo de elasticidad longitudinal obtenido mediante galgas extensométricas (E) = 18.162 MPa.

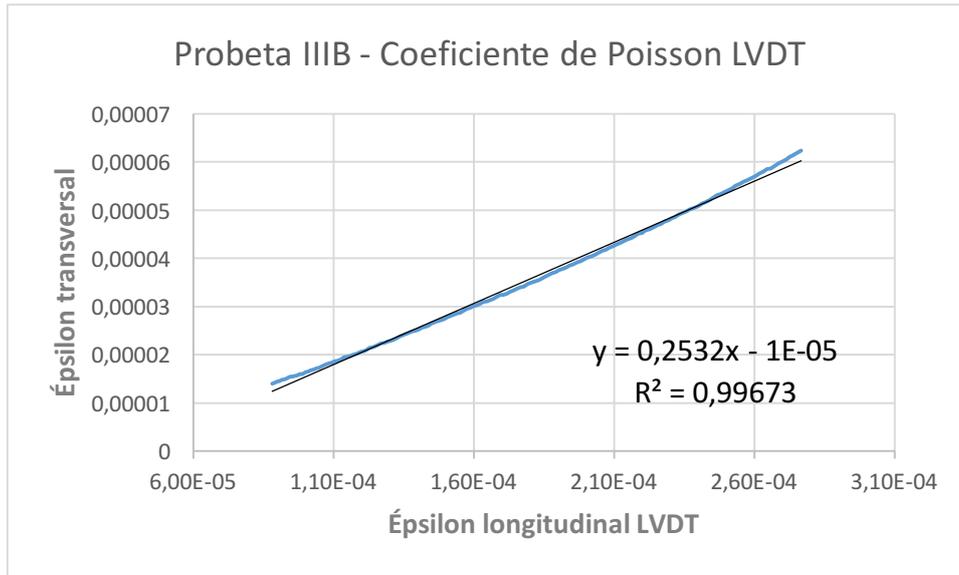


Ilustración 62. PROBETA IIIB. Coeficiente de Poisson obtenido mediante LVDT.

Coeficiente de Poisson obtenido mediante LVDT ( $\nu$ ) = 0,253.

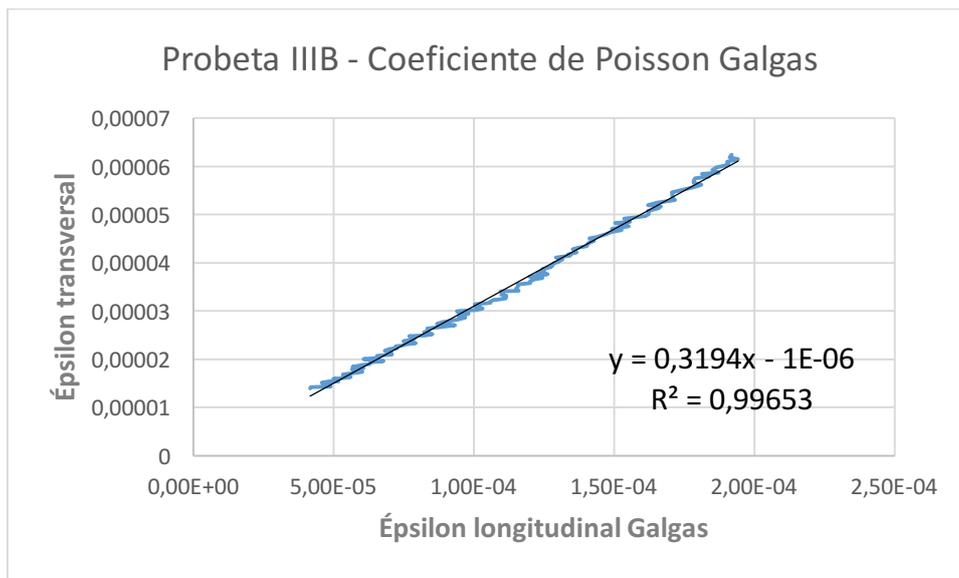


Ilustración 63. PROBETA IIIB. Coeficiente de Poisson obtenido mediante galga.

Coeficiente de Poisson obtenido mediante galgas extensométricas ( $\nu$ ) = 0,319.

Tabla 19. PROBETA IIIB. Densidad aparente para las dimensiones originales y tras ser retocada.

	Original	Retocada
Peso (g)	3.511,4	3.317,7
Longitud (mm)	219	208
Diámetro medio (mm)	103,16	103,16
<b>Densidad aparente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1.918,455</b>	<b>1.908,487</b>



Ilustración 64. Rotura de probeta III B.

Se observa una rotura mediante planos paralelos al eje longitudinal de la probeta, junto con una rotura inclinada en la parte inferior. La forma de esta rotura obligó a retirar el LVDT transversal cuando se observó que podría estar en riesgo su integridad, de modo que el ensayo finalizó sin la medición del LVDT transversal.

## 4.2 Análisis de resultados

Tras la obtención de los resultados, detallados anteriormente en el apartado 4.1, se realizó un estudio sobre los parámetros obtenidos, extrayendo información de diversos autores. Estos valores de estudios aportaron un marco de cotejo para la elaboración de un análisis final de conclusiones.

Tabla 20. Tabla resumen de resultados obtenidos con comparativa a resultados de estudios previos.

	IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	Valores de estudios
<b>E<sub>d</sub> (MPa)</b>	29.050	15.400	15.800	6.880	7.480	17.720	8.000 – 70.000
<b>E<sub>e</sub> LVDT (MPa)</b>	1.349,6	11.249	12.815	6.428,7	5.933,9	15.322	
<b>E<sub>e</sub> galga (MPa)</b>	-	12.147	12.620	7.200,1	6931,7	18.162	
<b>G<sub>d</sub> (MPa)</b>	32.300	13.700	15.740	6.580	7.600	16.600	
<b>v LVDT</b>	2,274	0,110	-	0,8712	0,864	0,253	0,12 – 0,3

$V_{galga}$	-	0,118	-	0,982	1,107	0,319	
$\sigma_{rot}$ (MPa)	1,722	7,330	5,448	2,752	3,563	6,054	1 – 113
$\gamma_{ap d}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2.000	1.881,34	1.863,05	1.804,09	1.814,08	1.918,46	2.000 – 3.000
$\gamma_{ap e}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2.000	1.898,94	1.821,35	1.820,24	1.829,07	1.908,49	

Con el fin de evaluar las técnicas llevadas a cabo para la realización de cada uno de los diferentes ensayos se exponen de manera gráfica los resultados, que anteriormente han sido mostrados en la Tras la obtención de los resultados, detallados anteriormente en el apartado 4.1, se realizó un estudio sobre los parámetros obtenidos, extrayendo información de diversos autores. Estos valores de estudios aportaron un marco de cotejo para la elaboración de un análisis final de conclusiones.

Tabla 20, permitiendo al lector una evaluación comparativa directa entre las diferentes tecnologías de las que se hace uso.

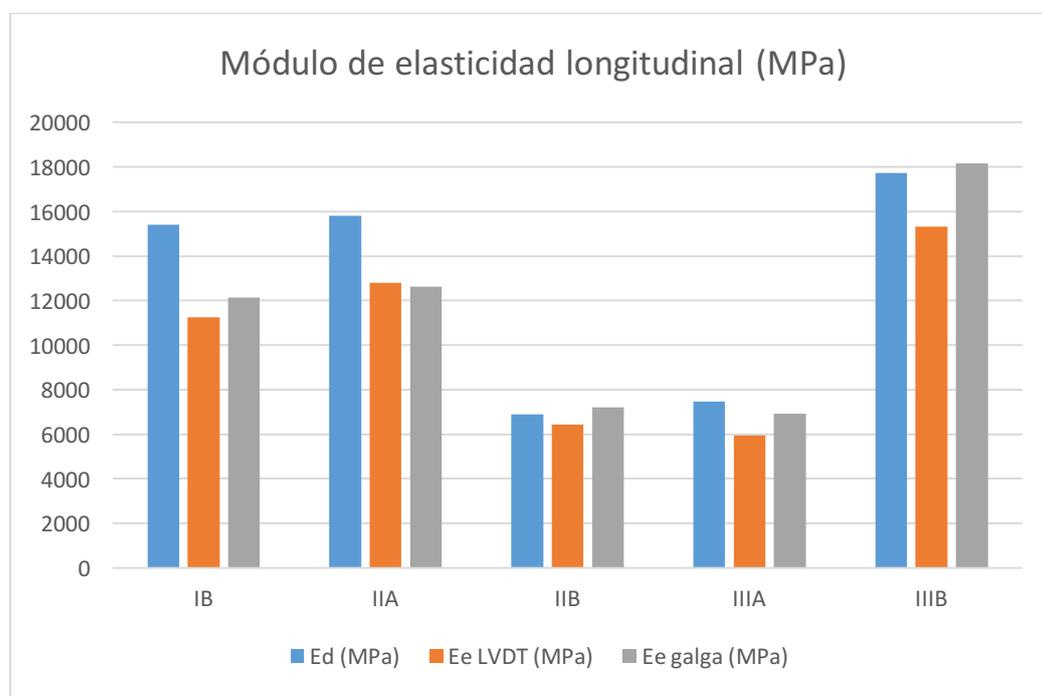


Ilustración 65. Módulo de elasticidad longitudinal - Gráfico comparativo.

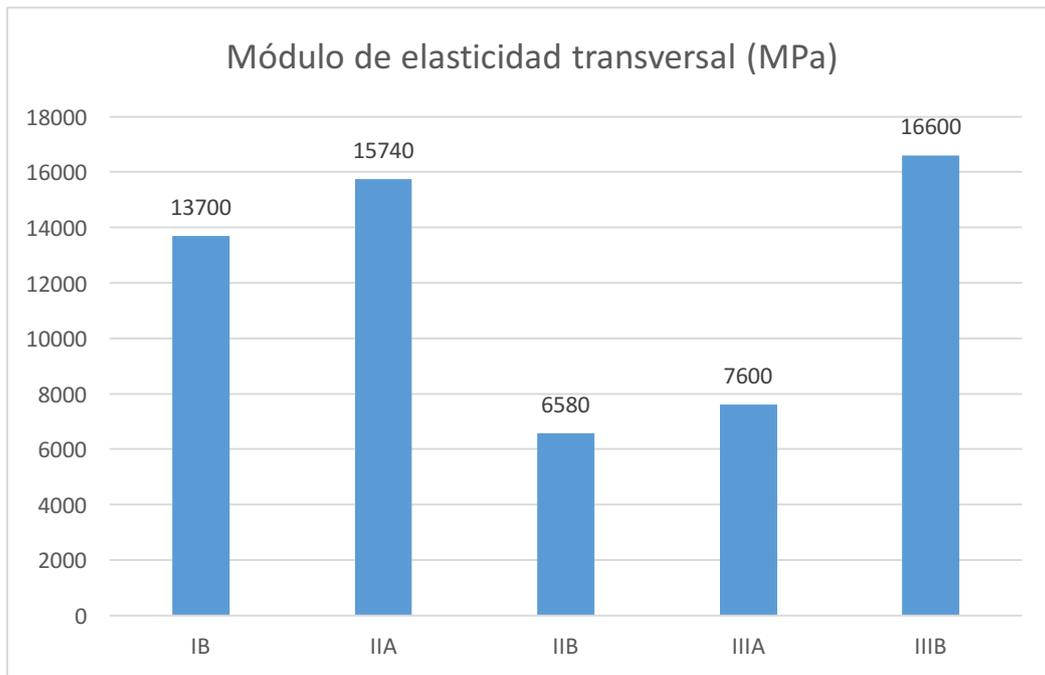


Ilustración 66. Módulo de elasticidad transversal - Gráfico ilustrativo.

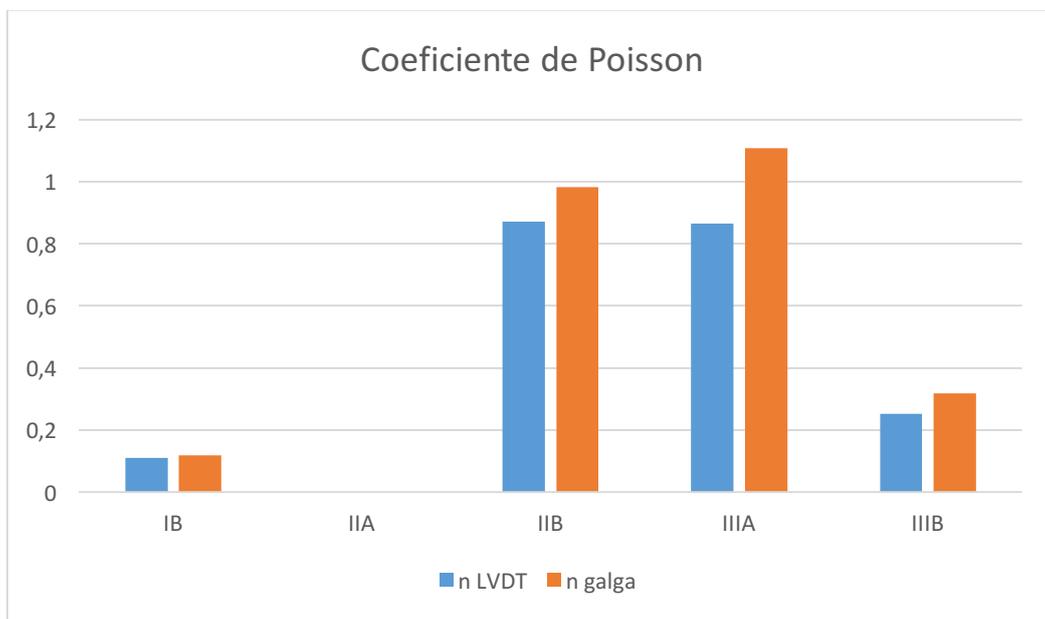


Ilustración 67. Coeficiente de Poisson - Gráfico comparativo.

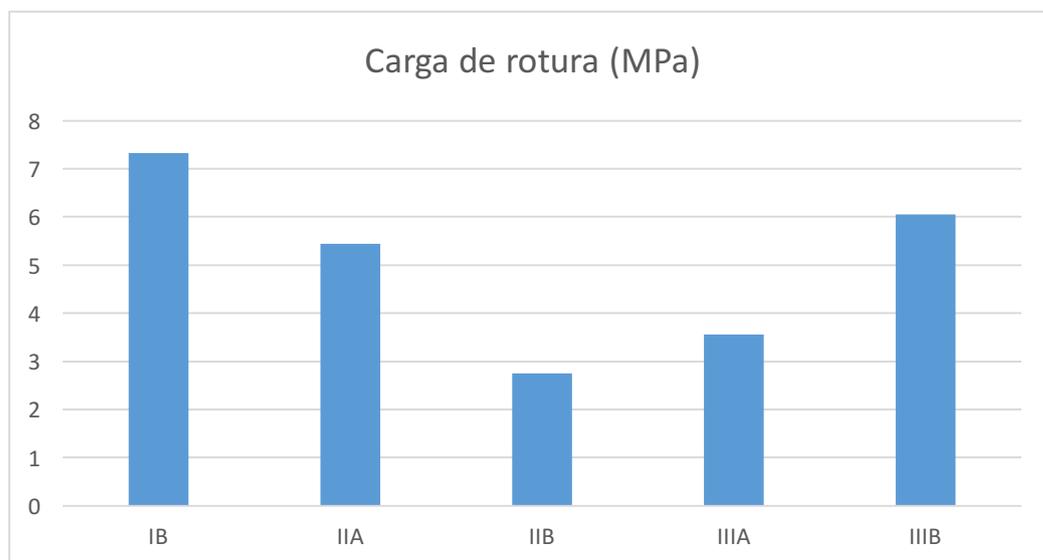


Ilustración 68. Carga de rotura - Gráfico ilustrativo.

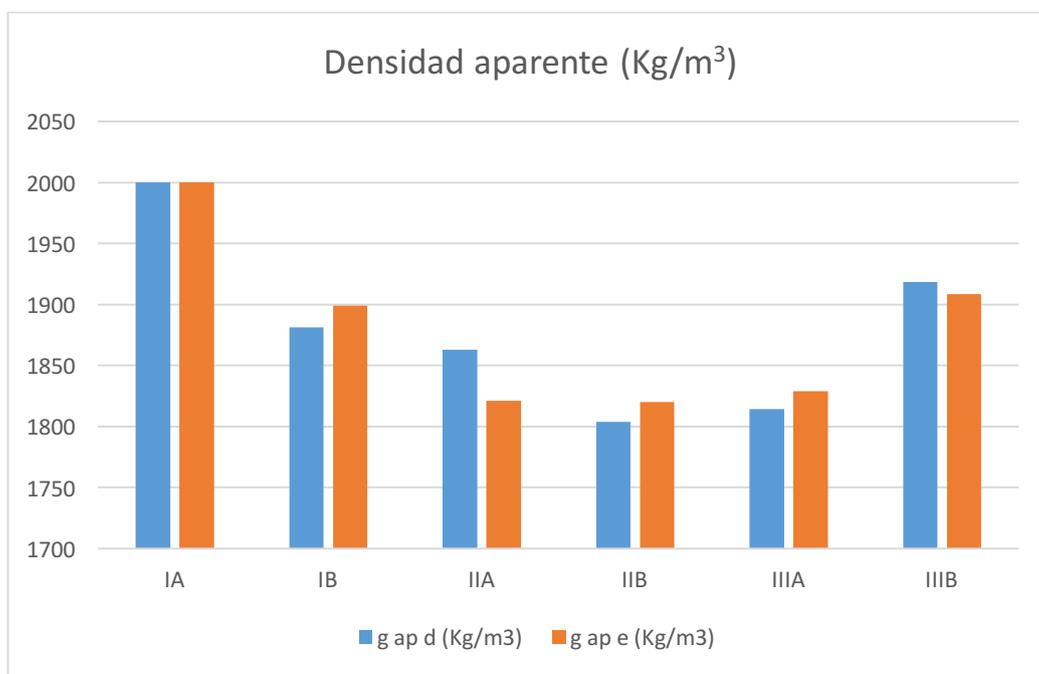


Ilustración 69. Densidad aparente - Gráfico comparativo.

Mediante estos gráfico se puede observar, de manera visual y sencilla, el alto grado de similitud en los resultados que aportan las diferentes tecnologías con las que se experimenta, corroborando entre si su correcto funcionamiento y su coherencia.

Los valores arrojados por la probeta IA se muestran en este estudio con la intención de exponer con la totalidad de resultados obtenido; pero su análisis no será llevado a cabo, debido a su total carencia de interés.

Se observa la disparidad de resultados entre muestras de la misma beta que aseguraba el etiquetado con el que fueron recibidas; sin embargo se detecta similitud entre muestras que inicialmente se suponen de diferentes betas, lo que lleva a la conclusión que muy probablemente el etiquetado de las muestras es erróneo. Se observa una mayor proximidad de resultados entre los pares de muestras IB-IIA y IIB-IIIA, lo que induce a pensar que cada par pertenece a la misma beta. La imposibilidad de analizar la probeta IA deja el estudio con cinco muestras y, por consiguiente, la probeta IIIB no puede ser asociada con otra probeta, pero queda evidente que procede de una beta diferente al resto de las probetas.

La baja calidad dimensional en la que se reciben las probetas impide el cumplimiento de la normativa aplicable haciendo la labor de caracterización mecánica, mediante los resultados obtenidos, un estudio orientativo que permite establecer unas bases para los futuros ensayos que se realizarán con la piedra.



## 5 Conclusión e implicaciones

### 5.1 Conclusiones

Este proyecto presenta la puesta a punto para una tanda de ensayos realizados a la piedra caliza del Cerro de San Cristóbal. Con él se consigue adquirir los conocimientos, teóricos y prácticos, que engloban a un estudio experimental. Esto conduce a dos posibles caminos del análisis final que se puede extrapolar a partir del trabajo realizado. Una vertiente principal que evalúa la esencia del proyecto, donde se analiza las diferentes técnicas, tecnologías y metodologías utilizadas en los distintos tipos de ensayos; y una segunda vertiente que se extrae de toda campaña experimental, aunque este proyecto no centre su finalidad en ello, el análisis del comportamiento de la roca caliza utilizada como muestra.

#### 5.1.1 *Análisis comparativo de las diferentes tecnologías empleadas*

Los estudios realizados con los dos diferentes tipos de ensayos, dinámico y estático, permiten observar la alta utilidad del ensayo dinámico frente al estático en relación con las futuras tandas de ensayos que se llevarán a cabo para la caracterización de la piedra calcarenítica del Cerro de San Cristóbal. Su facilidad de uso y adaptabilidad hacen que la forma y tamaño de las probetas que se ensayen no sean un condicionante a la hora de seleccionar esta tecnología, a diferencia de en el ensayo estático, que, aunque el utillaje diseñado permite holgura en las dimensiones de la probeta, supone una barrera a superar en el caso de variar la forma de las muestras.

La repetitividad del ensayo dinámico permite la verificación de los resultados, aportando seguridad a las pruebas que con él se ejecutan, pudiendo realizar tantas como se desee. Así mismo el hecho de ser un ensayo no destructivo aumenta su valor como método de caracterización mecánica de roca utilizada en edificación; cualidad que se ve sumamente impulsada debido al hecho de ser un equipo portátil con el que realizar los ensayo directamente in situ sin necesidad de dañar la propia estructura extrayendo muestras de ella para su posterior análisis.

El ensayo estático, como ya se ha mencionado, requiere de la fabricación de un utillaje específico para sustentar los sensores que miden la deformación experimentada por la probeta. Este utillaje permite utilizar de una tecnología que facilita el proceso de obtención de datos, sustituyendo a las galgas extensométricas; que no podrán ser utilizadas en los ensayos futuros que someterán a estudio piedra húmeda.

Sin embargo este ensayo permite ver, de manera tangible, el verdadero comportamiento de la piedra llevándola hasta la rotura. Así mismo, de él es posible extraer más parámetros de caracterización que del ensayo dinámico pudiendo realizar un estudio más detallado y completo.

Realizando una comparativa de los resultados arrojados por ambos ensayos, dinámico y estático, reflejan un alto grado de semejanza, no distando entre sí más de un 27%; teniendo en cuenta que la diferencia entre los resultados captados por LVDT y por galgas ascienden a un 16%, tecnologías empleadas a la vez en el mismo ensayo; se puede dictaminar que la utilización del ensayo dinámico es válida y aporta valores coherentes para la caracterización de la piedra.

En relación a la comparativa entre la tecnología de medición de LVDT y la de galgas extensométricas, queda resaltada la mayor exactitud de captación de los LVDT en comparación con las galgas, debido a que con los sensores electrónicos se respeta la imposición que realiza la normativa y de este modo se evita la distorsión en los resultados que genera un material heterogéneo como es la piedra calcarenítica.

#### *5.1.2 Conclusiones extraídas del análisis de resultados*

Primeramente cabe destacar la importancia de la correcta etiquetación de las probetas. En una muestra tan reducida como de la que se dispone para esta puesta a punto de una tanda de ensayos ha sido sencillo concluir el fallo en este aspecto, pero en una tanda de ensayos con un número significativo de muestras puede ser un error no detectable e inducir a falsas conclusiones invalidando el estudio por completo.

Otro aspecto importante que se debe cuidar es la obtención de las probetas, al tratarse de un material tan delicado su extracción debe ser precisa, buscando alcanzar las tolerancias especificadas por la norma.

Las conclusiones alcanzadas mediante el análisis de los resultados arrojados por los ensayos realizados a la piedra se toman como valores de referencia para los futuros ensayos que serán realizados.

Otros autores han realizado estudios de caracterización mecánica de piedra caliza, los cuales muestran valores muy diferentes dependiendo de la tipología de la piedra. De estos autores se obtienen escalas de referenciales para cada parámetro con el fin de realizar un estudio comparativo, como se puede ver en la Tabla 20.

Tras analizar diferentes bibliografías se concluye que el módulo de elasticidad de la piedra caliza abarca desde los 8.000 MPa hasta los 70.000 MPa, quedando los valores obtenidos en este ensayo incluso fuera de este rango, como es el caso de las probetas IIB (con un valor máximo de 7.200 MPa) y la probeta IIIA (con un valor máximo de 7.480 MPa)

Los valores del coeficiente de Poisson obtenido muestran valores extremadamente dispares, siendo otra vez las probetas IIB y IIIA las que muestran valores poco frecuentes representativos de un coeficiente de Poisson.

La densidad aparente es ligeramente inferior al valor inferior de la escala determinada por otros autores; sin embargo los valores entre sí no divergen de manera tan llamativa con en el caso del coeficiente de Poisson.

A la luz de los resultados obtenido se puede concluir que no se trata de un material isotrópico, observándose que no cumple la relación entre el módulo de elasticidad longitudinal, transversal y el coeficiente de Poisson que poseen los materiales isotrópicos. También se observa que los coeficientes de Poisson de las probetas IIB y IIIA superan el límite de 0,5 de los materiales isotrópicos.

## 5.2 Implicaciones

A la luz de las conclusiones extraídas:

- Debe quedar claro un modelo metodológico estándar para cada uno de los ensayos a estudio, de manera que se siga siempre la misma rutina para la ejecución de los mismos y obtener, de este modo, resultados comparables.
- Se resalta la importancia de realizar una puesta a punto para una campaña experimental que corrija y prevenga errores durante el proceso de ensayo.
- Se determina que los pasos a seguir para el desarrollo de una puesta a punto deben ser: el estudio teórico de la materia, selección del ensayo, recopilación de normativa, obtención de utillaje y material auxiliar necesario, preparación del puesto de trabajo y realización experimental de los métodos de ensayos estudiados.

## 5.3 Limitaciones

En el caso de la realización futuras campañas experimentales que utilicen los ensayos que se han puesto a punto, pueden acontecer las siguientes limitaciones que se deben prevenir:

- Etiquetado erróneo de las probetas, que conduzca a dictaminar conclusiones equivocadas.
- Baja calidad dimensional y de acabado de las probetas que dificulte o imposibilite el cumplimiento de la normativa vigente.

## **5.4 Consecuencias de la investigación**

Como consecuencia directa de la realización de este proyecto de puesta a punto de una campaña experimental de ensayos, tanto dinámicos como estáticos, que se realizarán sobre la piedra calcarenítica del Cerro de San Cristóbal, se obtiene la subsecuente campaña de ensayos para la caracterización de dicha piedra que se llevará a cabo por el mismo departamento y área de conocimiento implicados en este estudio. La futura campaña versará sobre el estudio de la influencia de la humedad en las características mecánicas de la piedra calcarenítica del Cerro de San Cristóbal, expuesta a ensayo en este proyecto.

## 6 Bibliografía

**Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de estructuras. 2011.** Apuntes para una breve introducción a la Resistencia de Materiales y temas relacionados. s.l. : Inédito, 2011. Apuntes del Área de conocimiento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de estructuras de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid..

**AEN/CTN 22. 2004.** *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad dinámico (con la medida de la frecuencia de resonancia fundamental).* Madrid : AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación, 2004. Esta norma es la versión oficial, es español, de la Norma Europea EN 14146 de abril de 2004.

—. **2006.** *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad estático.* Madrid : AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación., 2006.

**ASTM C215. 2003.** *Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens.* West Conshohocken : ASTM International, 2003.

**Brotos Torres, Vicente. 2014.** *Propiedades físicas y mecánicas de una calcarenita: la Piedra de San Julián.* Alicante : Universidad de Alicante, 2014.

**Cabona, Carlos A y Fraga, Héctor R. 2004.** *Propiedades elásticas de las rocas.* Rosario : Universidad Nacional de Rosario, 2004.

**Callister, William D Jr y Rethwisch, David G. 2007.** *Materials science and engineering: an introduction.* Utah : John Wiley & Sons, Inc., 2007.

**Cimadevilla Salcines, Alfonso. 1996.** *Proyecto de excavación y sostenimiento de túnel de Camijanes.* Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 1996.

**Gálvez, F.J, y otros. 1998.** *Curso teórico - práctico de fundamentos físicos de la ingeniería.* Valencia : Tébar Flores, 1998.

**Levantina y Asociados de Minerales S.A.U. 2016.** LEVANTINA. The Natural Stone Company. [En línea] 2016. [Citado el: 1 de Agosto de 2016.] [www.levantina.com/es/materiales#contenedor\\_slide](http://www.levantina.com/es/materiales#contenedor_slide).

**Negrete, José Pedro Agustín Valera. 2005.** *Apuntes de Física General.* México D.F. : Universidad nacional Autónoma de México, 2005.

**Parent, Thomas, y otros. 2015.** *Mechanical characterization of limestone from sound velocity measurement.* Munich : Elsevier B. V., 2015.

**Vasanelli, Emilia, y otros. 2016.** *Assessing the reliability of non-destructive and moderately invasive technique for the evaluation of uniaxial compressive strength of stone masonry units.* Munich : Elsevier B. V., 2016.

**Zienkiewicz, Stagg - 1970.** *Mecánica de rocas en la ingeniería práctica.* Madrid : Blume, 1970. Extracto de trabajo anónimo, "Geomecánica de rocas" de la Cátedra "Geología y geotecnia" de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Rosario..





## 7 Anexos

### 7.1 Códigos de ejecución de las piezas en la máquina de control numérico

#### 7.1.1 Piezas 1 y 2

; Pieza 1 interior

T1 D1

M6

M08

F150 S2000

M03

G90

G0 X0 Y0 Z200

G0 X0 Y0 Z20

F50

G42

G1 X58.22 Y-14.69 Z-4

F150

G3 X59.11 Y-16.85 R2

G1 X64.69 Y-20.69

G2 X65.16 Y-27.27 R6

G1 X56.10 Y-42.92

G2 X49.04 Y-45.63 R6

G1 X44.10 Y-42.92

G3 X41.99 Y-42.92 R2

G2 X-42.02 Y-42.92 R60

G3 X-43.98 Y-42.80 R2

G1 X-49.07 Y-45.63

G2 X-55.43 Y-43.86 R6

G1 X-65.66 Y-26.22

G2 X-63.90 Y-19.86 R6

G1 X-59.19 Y-16.92

G3 X-58.25 Y-14.69 R2

G2 X58.22 Y-14.69 R-60

G1 X0 Y0 Z10

; Pasada a z-8

F50

G42

G1 X58.22 Y-14.69 Z-8

F150

G3 X59.11 Y-16.85 R2

G1 X64.69 Y-20.69  
G2 X65.16 Y-27.27 R6  
G1 X56.10 Y-42.92  
G2 X49.04 Y-45.63 R6  
G1 X44.10 Y-42.92  
G3 X41.99 Y-42.92 R2  
G2 X-42.02 Y-42.92 R60  
G3 X-43.98 Y-42.80 R2  
G1 X-49.07 Y-45.63  
G2 X-55.43 Y-43.86 R6  
G1 X-65.66 Y-26.22  
G2 X-63.90 Y-19.86 R6  
G1 X-59.19 Y-16.92  
G3 X-58.25 Y-14.69 R2  
G2 X58.22 Y-14.69 R-60  
G1 X0 Y0 Z10  
; Pasada a z-12  
F50  
G42  
G1 X58.22 Y-14.69 Z-12  
F150  
G3 X59.11 Y-16.85 R2  
G1 X64.69 Y-20.69  
G2 X65.16 Y-27.27 R6  
G1 X56.10 Y-42.92  
G2 X49.04 Y-45.63 R6  
G1 X44.10 Y-42.92  
G3 X41.99 Y-42.92 R2  
G2 X-42.02 Y-42.92 R60  
G3 X-43.98 Y-42.80 R2  
G1 X-49.07 Y-45.63  
G2 X-55.43 Y-43.86 R6  
G1 X-65.66 Y-26.22  
G2 X-63.90 Y-19.86 R6  
G1 X-59.19 Y-16.92  
G3 X-58.25 Y-14.69 R2  
G2 X58.22 Y-14.69 R-60  
G1 X0 Y0 Z10  
; Pasada a z-16.5  
F50  
G42  
G1 X58.22 Y-14.69 Z-16.5

F150

G3 X59.11 Y-16.85 R2  
G1 X64.69 Y-20.69  
G2 X65.16 Y-27.27 R6  
G1 X56.10 Y-42.92  
G2 X49.04 Y-45.63 R6  
G1 X44.10 Y-42.92  
G3 X41.99 Y-42.92 R2  
G2 X-42.02 Y-42.92 R60  
G3 X-43.98 Y-42.80 R2  
G1 X-49.07 Y-45.63  
G2 X-55.43 Y-43.86 R6  
G1 X-65.66 Y-26.22  
G2 X-63.90 Y-19.86 R6  
G1 X-59.19 Y-16.92  
G3 X-58.25 Y-14.69 R2  
G2 X58.22 Y-14.69 R-60  
G1 X0 Y0 Z10

; Pasada a z-21

F50

G42

G1 X58.22 Y-14.69 Z-21

F150

G3 X59.11 Y-16.85 R2  
G1 X64.69 Y-20.69  
G2 X65.16 Y-27.27 R6  
G1 X56.10 Y-42.92  
G2 X49.04 Y-45.63 R6  
G1 X44.10 Y-42.92  
G3 X41.99 Y-42.92 R2  
G2 X-42.02 Y-42.92 R60  
G3 X-43.98 Y-42.80 R2  
G1 X-49.07 Y-45.63  
G2 X-55.43 Y-43.86 R6  
G1 X-65.66 Y-26.22  
G2 X-63.90 Y-19.86 R6  
G1 X-59.19 Y-16.92  
G3 X-58.25 Y-14.69 R2  
G2 X58.22 Y-14.69 R-60  
G1 X0 Y0 Z10

; Pieza 1 exterior

T1 D1

M6

M08

F150 S2000

M03

G90

G0 X-130 Y30 Z200

G0 Z20

F50

G41

G1 X-111.07 Y12.49 Z-4

F150

G1 X-82.96 Y12.49

G3 X-78.25 Y17.19 R6

G2 X78.10 Y17.20 R80

G3 X83.99 Y12.49 R6

G1 X111.04 Y12.49

G2 X113.04 Y10.37 R2

G1 X113.04 Y-10.57

G2 X111.4 Y-12.57 R2

G1 X83.99 Y-12.57

G3 X78.10 Y-17.28 R6

G1 X76.47 Y-23.11

G3 X79.75 Y-28.80 R6

G1 X83.75 Y-31.16

G2 X84.45 Y-33.86 R2

G1 X71.40 Y-56.33

G2 X68.69 Y-57.04 R2

G1 X64.69 Y-54.81

G3 X57.40 Y-58.86 R6

G2 X-57.42 Y-55.86 R80

G3 X-64.84 Y-54.81 R6

G1 X-68.72 Y-57.04

G2 X-71.31 Y-56.69 R2

G1 X-84.49 Y-33.86

G2 X-83.78 Y-31.16 R2

G1 X-79.78 Y-28.81

G3 X-77.55 Y-20.22 R6

G1 X-78.02 Y-17.86

G3 X-84.02 Y-12.57 R6

G1 X-111.43 Y-12.57

G2 X-113.04 Y-10.57 R2

G1 X-113.04 Y10.37

G2 X-111.7 Y12.49 R2  
G1 X-100  
Z2  
G40  
G1 X-130 Y30 Z2  
; Pasada a z-8  
F50  
G41  
G1 X-111.07 Y12.49 Z-8  
F150  
G1 X-82.96 Y12.49  
G3 X-78.25 Y17.19 R6  
G2 X78.10 Y17.20 R80  
G3 X83.99 Y12.49 R6  
G1 X111.04 Y12.49  
G2 X113.04 Y10.37 R2  
G1 X113.04 Y-10.57  
G2 X111.4 Y-12.57 R2  
G1 X83.99 Y-12.57  
G3 X78.10 Y-17.28 R6  
G1 X76.47 Y-23.11  
G3 X79.75 Y-28.80 R6  
G1 X83.75 Y-31.16  
G2 X84.45 Y-33.86 R2  
G1 X71.40 Y-56.33  
G2 X68.69 Y-57.04 R2  
G1 X64.69 Y-54.81  
G3 X57.40 Y-58.86 R6  
G2 X-57.42 Y-55.86 R80  
G3 X-64.84 Y-54.81 R6  
G1 X-68.72 Y-57.04  
G2 X-71.31 Y-56.69 R2  
G1 X-84.49 Y-33.86  
G2 X-83.78 Y-31.16 R2  
G1 X-79.78 Y-28.81  
G3 X-77.55 Y-20.22 R6  
G1 X-78.02 Y-17.86  
G3 X-84.02 Y-12.57 R6  
G1 X-111.43 Y-12.57  
G2 X-113.04 Y-10.57 R2  
G1 X-113.04 Y10.37  
G2 X-111.7 Y12.49 R2

G1 X-100  
G40  
G1 X-130 Y30 Z2  
; Pasada a z-12  
F50  
G41  
G1 X-111.07 Y12.49 Z-12  
F150  
G1 X-82.96 Y12.49  
G3 X-78.25 Y17.19 R6  
G2 X78.10 Y17.20 R80  
G3 X83.99 Y12.49 R6  
G1 X111.04 Y12.49  
G2 X113.04 Y10.37 R2  
G1 X113.04 Y-10.57  
G2 X111.4 Y-12.57 R2  
G1 X83.99 Y-12.57  
G3 X78.10 Y-17.28 R6  
G1 X76.47 Y-23.11  
G3 X79.75 Y-28.80 R6  
G1 X83.75 Y-31.16  
G2 X84.45 Y-33.86 R2  
G1 X71.40 Y-56.33  
G2 X68.69 Y-57.04 R2  
G1 X64.69 Y-54.81  
G3 X57.40 Y-58.86 R6  
G2 X-57.42 Y-55.86 R80  
G3 X-64.84 Y-54.81 R6  
G1 X-68.72 Y-57.04  
G2 X-71.31 Y-56.69 R2  
G1 X-84.49 Y-33.86  
G2 X-83.78 Y-31.16 R2  
G1 X-79.78 Y-28.81  
G3 X-77.55 Y-20.22 R6  
G1 X-78.02 Y-17.86  
G3 X-84.02 Y-12.57 R6  
G1 X-111.43 Y-12.57  
G2 X-113.04 Y-10.57 R2  
G1 X-113.04 Y10.37  
G2 X-111.7 Y12.49 R2  
G1 X-100  
G40

G1 X-130 Y30 Z2  
; Pasada a z-16.5  
F50  
G41  
G1 X-111.07 Y12.49 Z-16.5  
F150  
G1 X-82.96 Y12.49  
G3 X-78.25 Y17.19 R6  
G2 X78.10 Y17.20 R80  
G3 X83.99 Y12.49 R6  
G1 X111.04 Y12.49  
G2 X113.04 Y10.37 R2  
G1 X113.04 Y-10.57  
G2 X111.4 Y-12.57 R2  
G1 X83.99 Y-12.57  
G3 X78.10 Y-17.28 R6  
G1 X76.47 Y-23.11  
G3 X79.75 Y-28.80 R6  
G1 X83.75 Y-31.16  
G2 X84.45 Y-33.86 R2  
G1 X71.40 Y-56.33  
G2 X68.69 Y-57.04 R2  
G1 X64.69 Y-54.81  
G3 X57.40 Y-58.86 R6  
G2 X-57.42 Y-55.86 R80  
G3 X-64.84 Y-54.81 R6  
G1 X-68.72 Y-57.04  
G2 X-71.31 Y-56.69 R2  
G1 X-84.49 Y-33.86  
G2 X-83.78 Y-31.16 R2  
G1 X-79.78 Y-28.81  
G3 X-77.55 Y-20.22 R6  
G1 X-78.02 Y-17.86  
G3 X-84.02 Y-12.57 R6  
G1 X-111.43 Y-12.57  
G2 X-113.04 Y-10.57 R2  
G1 X-113.04 Y10.37  
G2 X-111.7 Y12.49 R2  
G1 X-100  
G40  
G1 X-130 Y30 Z2  
; Pasada a z-21

F50

G41

G1 X-111.07 Y12.49 Z-21

F150

G1 X-82.96 Y12.49

G3 X-78.25 Y17.19 R6

G2 X78.10 Y17.20 R80

G3 X83.99 Y12.49 R6

G1 X111.04 Y12.49

G2 X113.04 Y10.37 R2

G1 X113.04 Y-10.57

G2 X111.4 Y-12.57 R2

G1 X83.99 Y-12.57

G3 X78.10 Y-17.28 R6

G1 X76.47 Y-23.11

G3 X79.75 Y-28.80 R6

G1 X83.75 Y-31.16

G2 X84.45 Y-33.86 R2

G1 X71.40 Y-56.33

G2 X68.69 Y-57.04 R2

G1 X64.69 Y-54.81

G3 X57.40 Y-58.86 R6

G2 X-57.42 Y-55.86 R80

G3 X-64.84 Y-54.81 R6

G1 X-68.72 Y-57.04

G2 X-71.31 Y-56.69 R2

G1 X-84.49 Y-33.86

G2 X-83.78 Y-31.16 R2

G1 X-79.78 Y-28.81

G3 X-77.55 Y-20.22 R6

G1 X-78.02 Y-17.86

G3 X-84.02 Y-12.57 R6

G1 X-111.43 Y-12.57

G2 X-113.04 Y-10.57 R2

G1 X-113.04 Y10.37

G2 X-111.7 Y12.49 R2

G1 X-100

G40

G1 X-130 Y30 Z2

M30

### 7.1.2 Piezas 3 y 4

; Pieza 3 y 4

T1 D1

M6

M08

F150 S2000

M03

G90

G0 X0 Y0 Z200

G0 X0 Y0 Z20

G1 Z2

F50

G41

G1 X-54.48 Y4.9 Z-4

F150

G1 X-81.54 Y4.9

G2 X-83.55 Y6.92 R2

G1 X-83.55 Y12.93

G2 X-81.54 Y14.99 R2

G1 X-65.21 Y14.99

G3 X-59.49 Y19.15 R6

G2 X-5 Y 62.30 R62.5

G1 X5 Y62.30

G2 X59.49 Y19.15 R62.5

G3 X69.15 Y14.99 R6

G1 X81.55 Y14.99

G2 X83.55 Y12.93 R2

G1 X83.55 Y6.92

G2 X81.54 Y4.9 R2

G1 X54.48 Y4.9

G2 X52.07 Y6.67 R2

G3 X-52.07 Y6.67 R52.5

G2 X-54.48 Y4.9 R2

G1 X-70 Y4.9

G40

G1 X0 Y0 Z2

; Pasada a z-8

F50

G41

G1 X-54.48 Y4.9 Z-8

F150

G1 X-81.54 Y4.9  
G2 X-83.55 Y6.92 R2  
G1 X-83.55 Y12.93  
G2 X-81.54 Y14.99 R2  
G1 X-65.21 Y14.99  
G3 X-59.49 Y19.15 R6  
G2 X-5 Y 62.30 R62.5  
G1 X5 Y62.30  
G2 X59.49 Y19.15 R62.5  
G3 X69.15 Y14.99 R6  
G1 X81.55 Y14.99  
G2 X83.55 Y12.93 R2  
G1 X83.55 Y6.92  
G2 X81.54 Y4.9 R2  
G1 X54.48 Y4.9  
G2 X52.07 Y6.67 R2  
G3 X-52.07 Y6.67 R52.5  
G2 X-54.48 Y4.9 R2  
G1 X-70 Y4.9  
G40  
G1 X0 Y0 Z2  
; Pasada a z-11  
F50  
G41  
G1 X-54.48 Y4.9 Z-11  
F150  
G1 X-81.54 Y4.9  
G2 X-83.55 Y6.92 R2  
G1 X-83.55 Y12.93  
G2 X-81.54 Y14.99 R2  
G1 X-65.21 Y14.99  
G3 X-59.49 Y19.15 R6  
G2 X-5 Y 62.30 R62.5  
G1 X5 Y62.30  
G2 X59.49 Y19.15 R62.5  
G3 X69.15 Y14.99 R6  
G1 X81.55 Y14.99  
G2 X83.55 Y12.93 R2  
G1 X83.55 Y6.92  
G2 X81.54 Y4.9 R2  
G1 X54.48 Y4.9  
G2 X52.07 Y6.67 R2

G3 X-52.07 Y6.67 R52.5

G2 X-54.48 Y4.9 R2

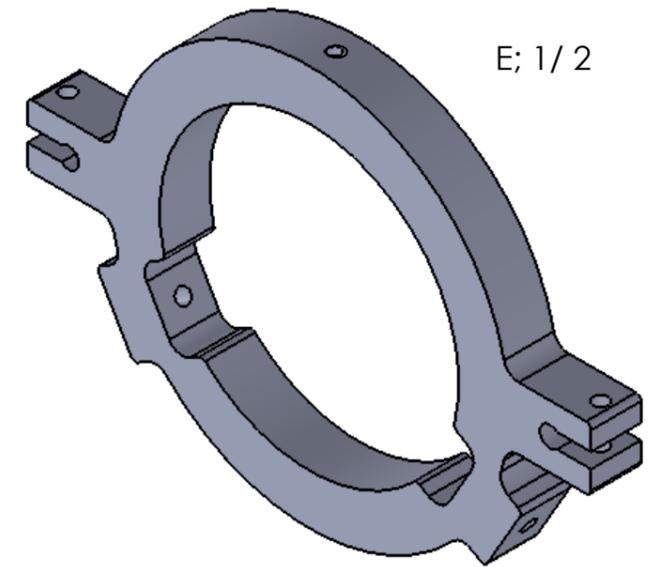
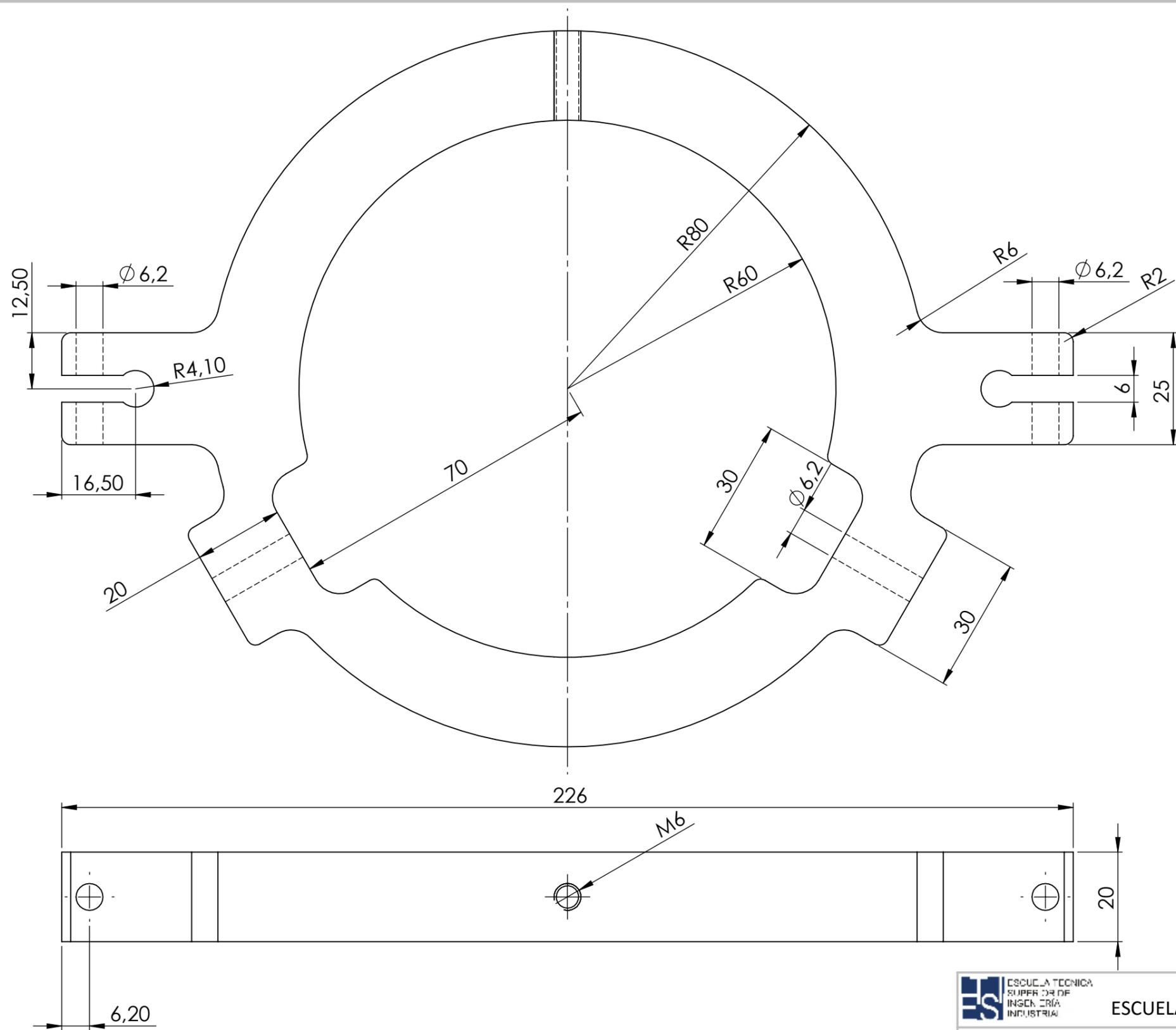
G1 X-70 Y4.9

G40

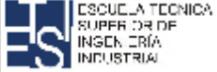
G1 X0 Y0 Z2

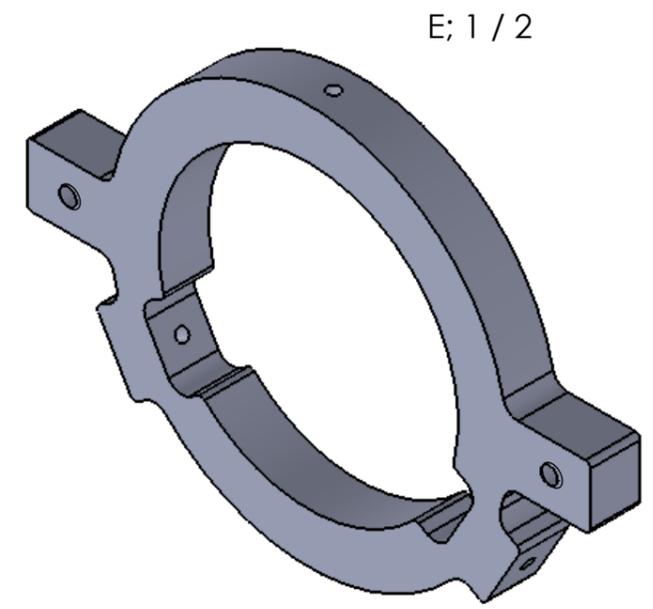
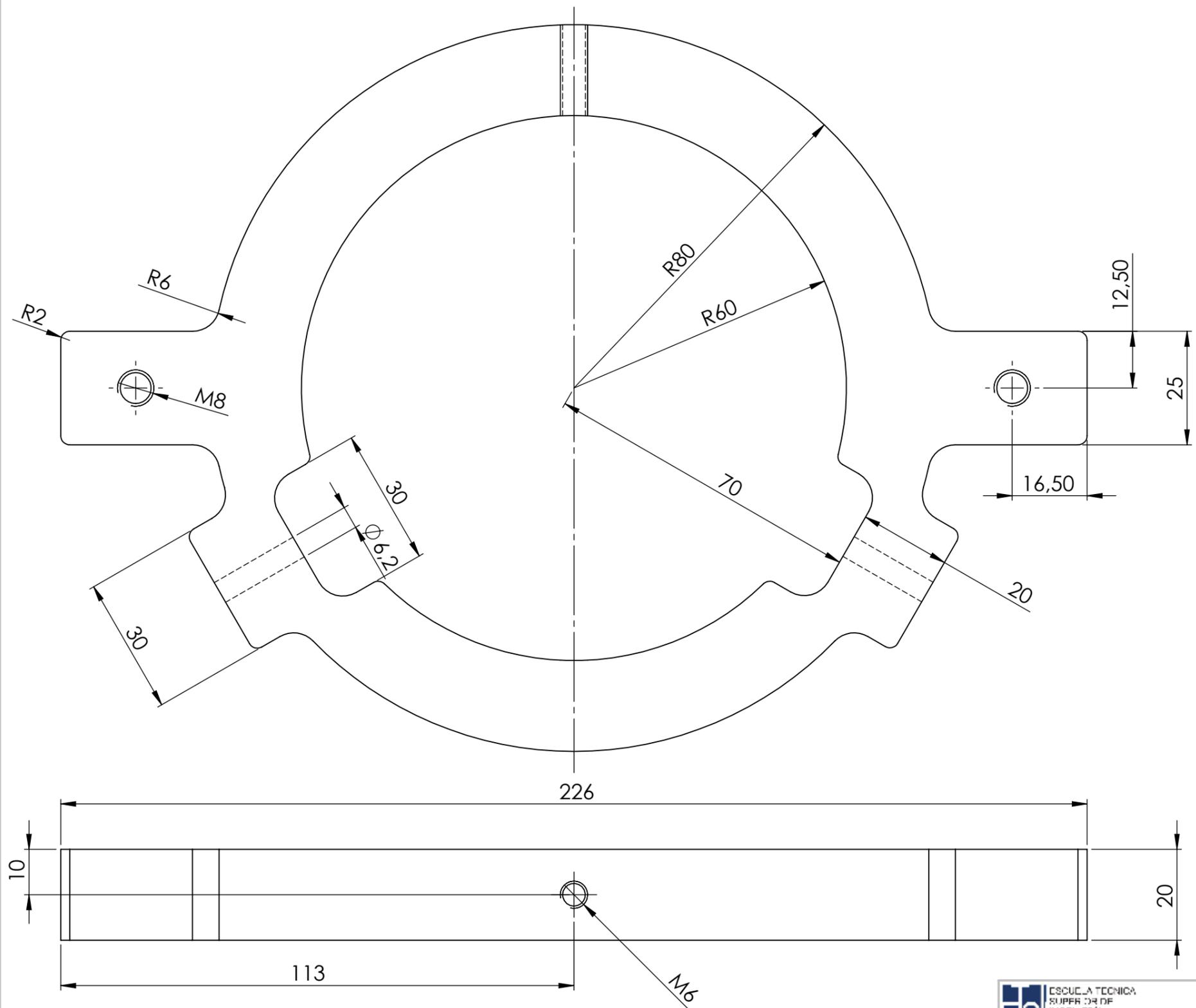
M30

## 7.2 Planos de extensómetro



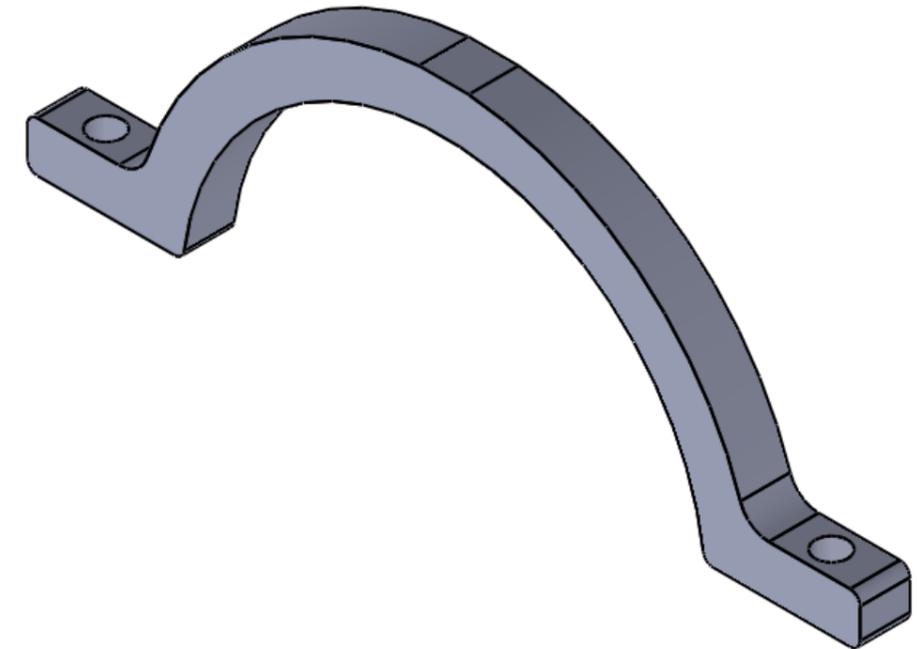
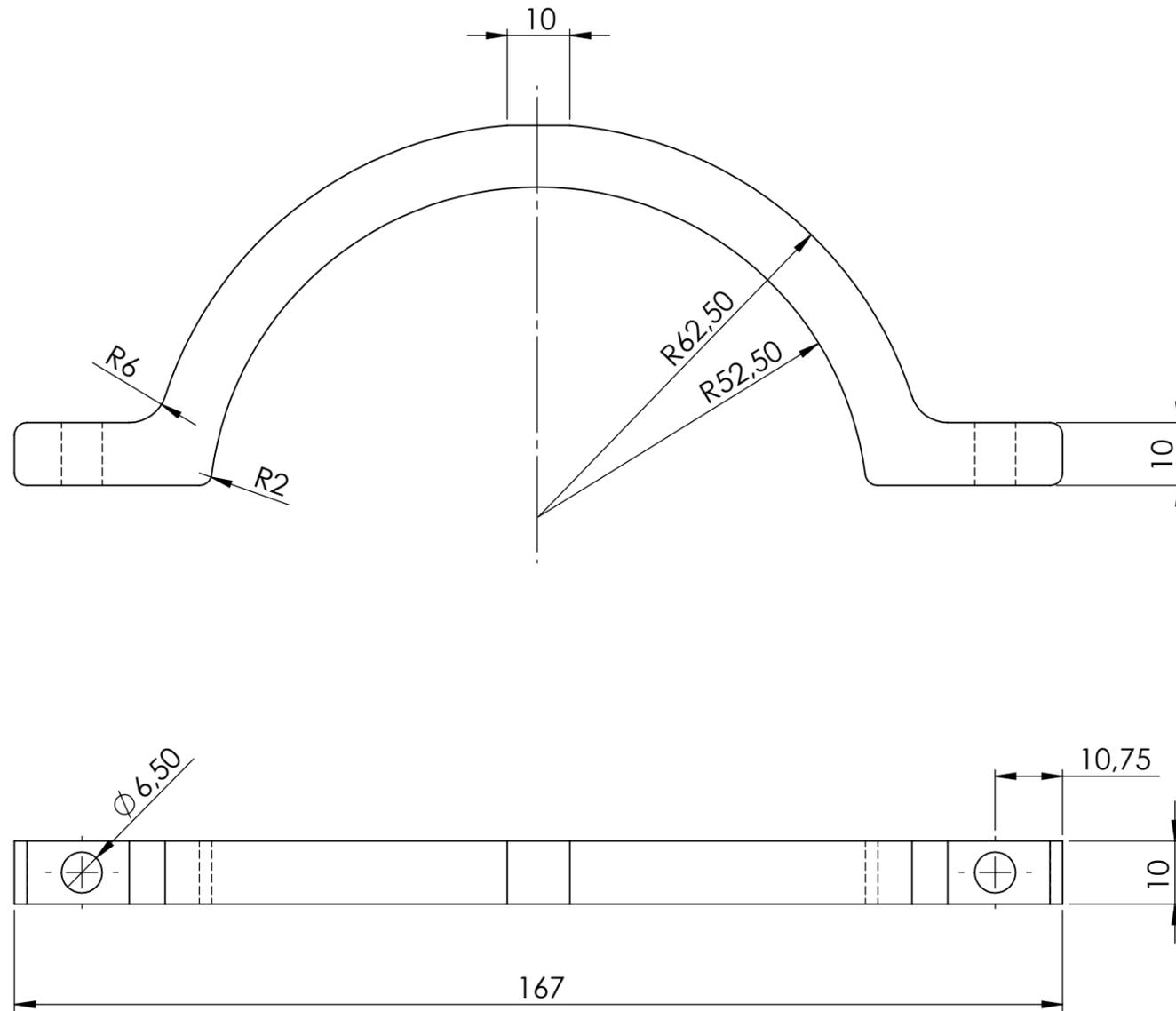
**SOLIDWORKS Student Edition.**  
Solo para uso académico.

 <b>UNIVERSIDAD DE MÁLAGA</b> ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA INDUSTRIAL		
<b>"Estudio de la influencia de la humedad y tratamientos de consolidación en el comportamiento de la piedra calcarenítica"</b>		
<b>Nombre:</b> Marta Cruces Correa	<b>Pieza número 1</b> <b>Anillo superior</b>	MÁLAGA agosto de 2016
<b>Firma</b>		ESCALA: 1 / 1
		PLANO Nº 1



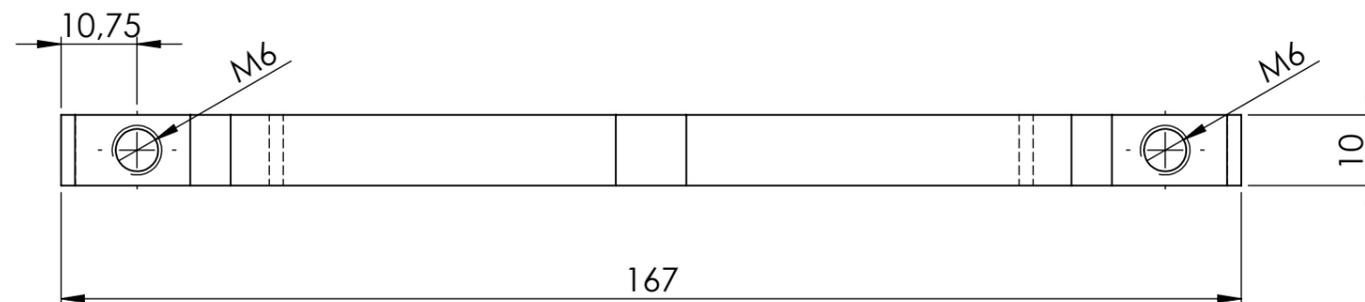
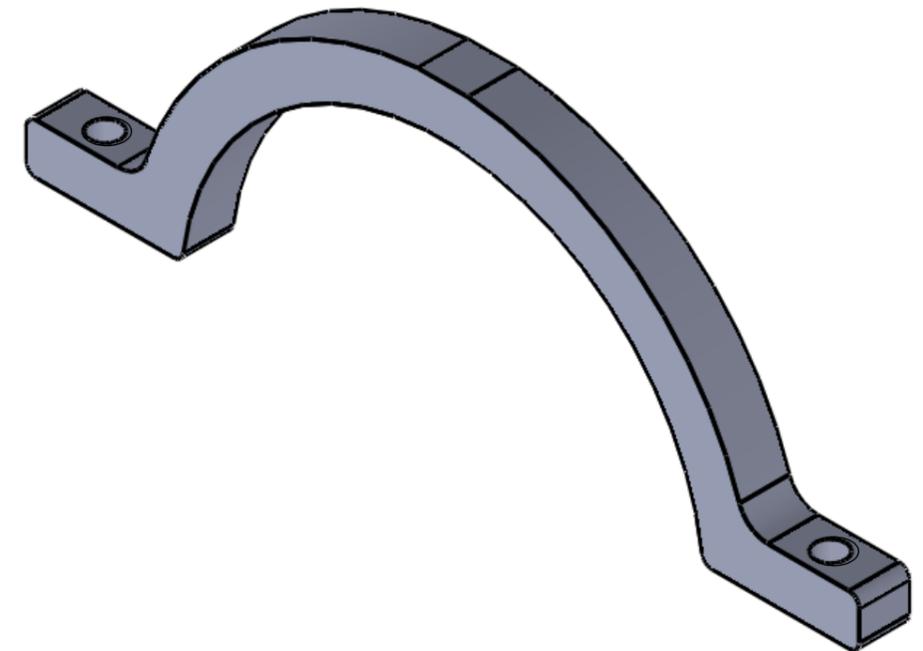
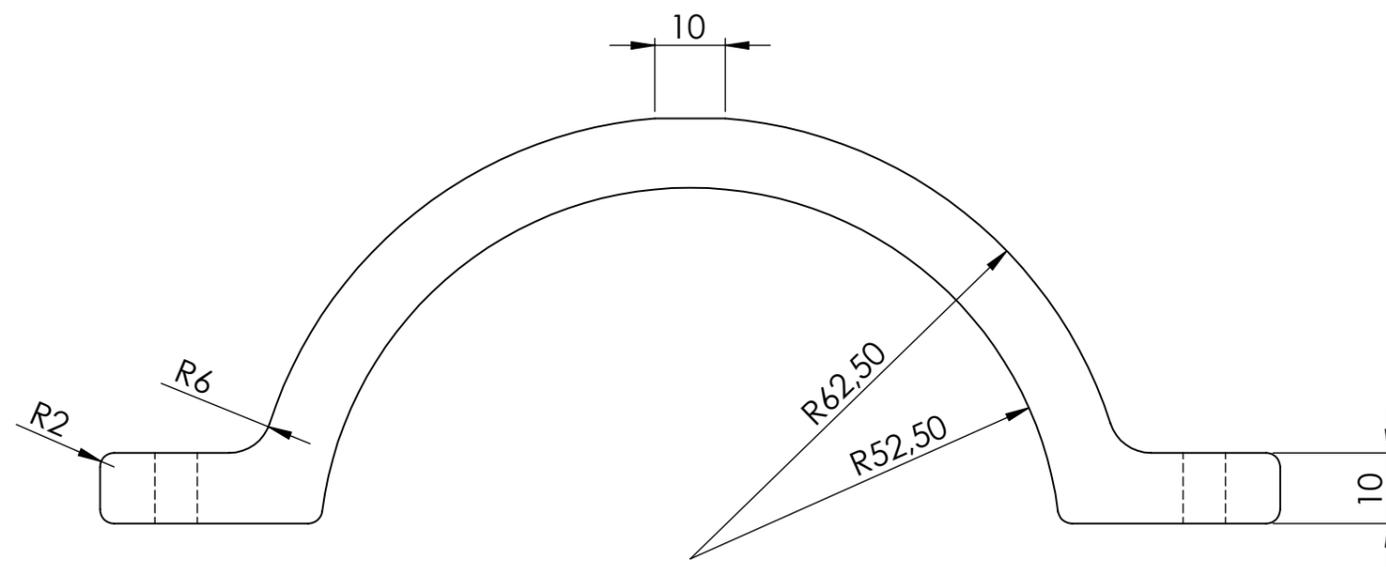
**SOLIDWORKS Student Edition.**  
Solo para uso académico.

 <b>UNIVERSIDAD DE MÁLAGA</b> ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA INDUSTRIAL		
<b>"Estudio de la influencia de la humedad y tratamientos de consolidación en el comportamiento de la piedra calcarenítica"</b>		
<b>Nombre:</b> Marta Cruces Correa	<h2>Pieza número 2</h2> <h2>Anillo inferior</h2>	MÁLAGA agosto de 2016
<b>Firma:</b>		ESCALA: 1 / 1
		PLANO Nº 2



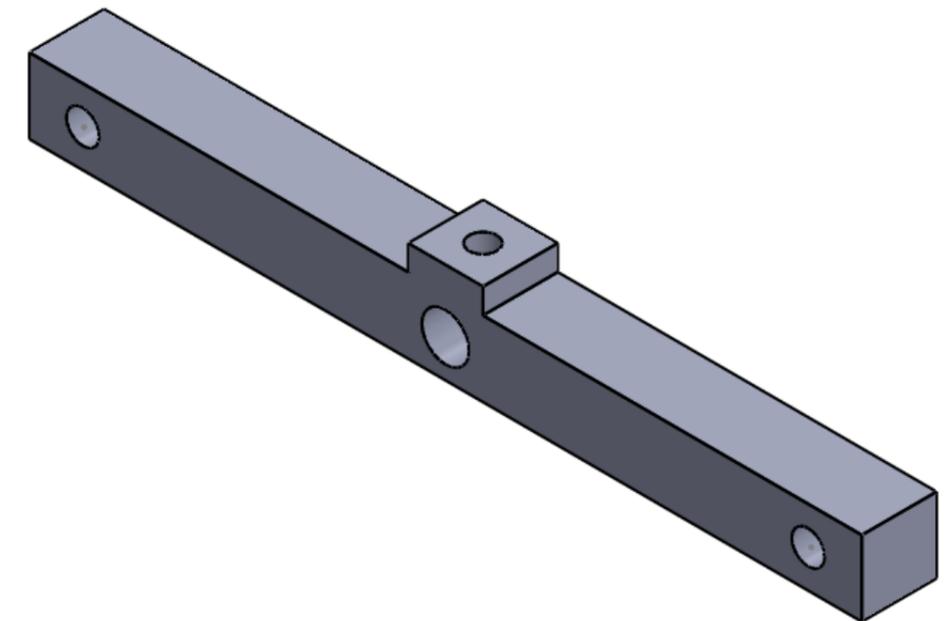
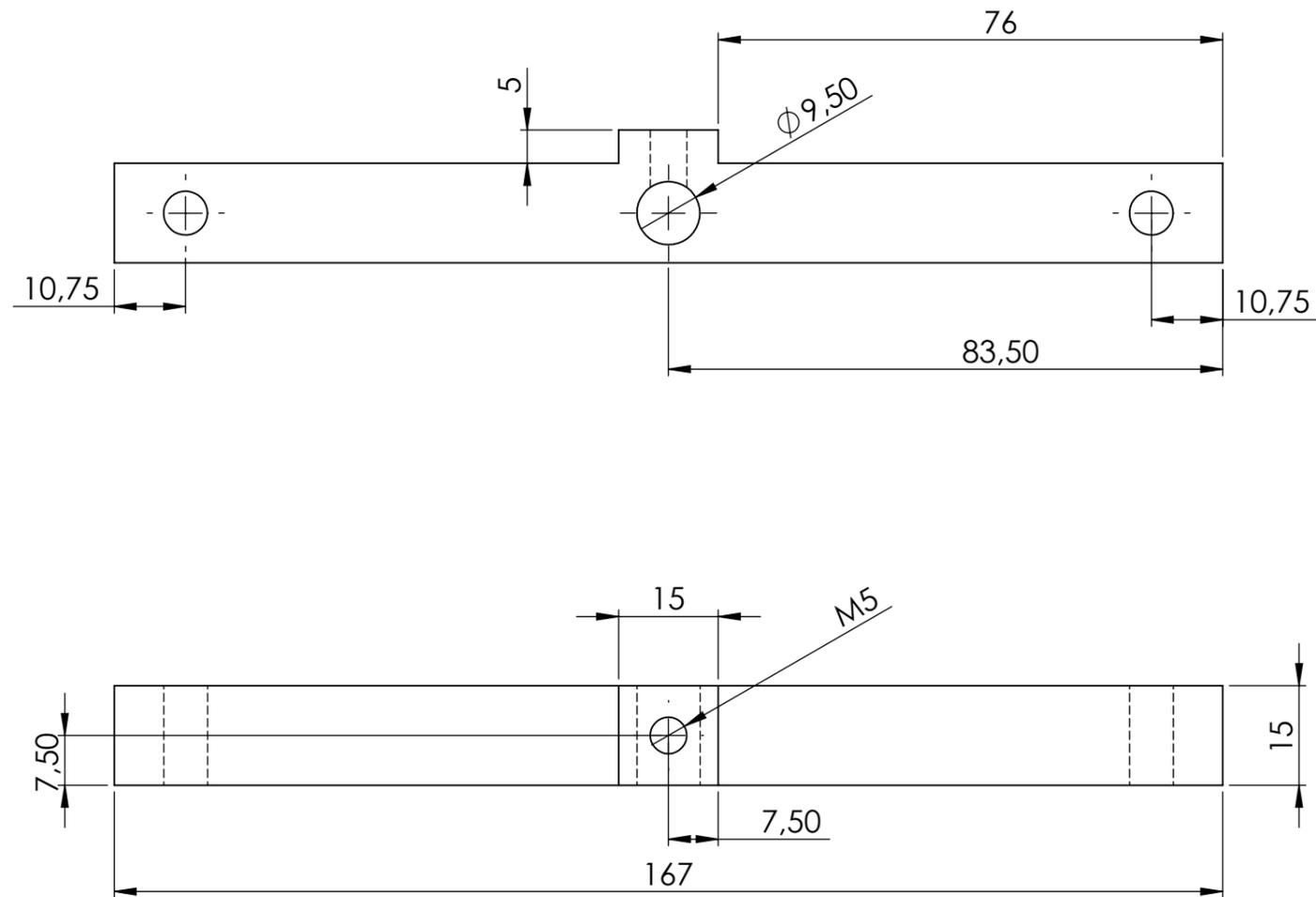
**SOLIDWORKS Student Edition.**  
Solo para uso académico.

 <b>UNIVERSIDAD DE MÁLAGA</b> ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA INDUSTRIAL		
<b>"Estudio de la influencia de la humedad y tratamientos de consolidación en el comportamiento de la piedra calcarenítica"</b>		
<b>Nombre:</b> Marta Cruces Correa	<b>Pieza número 3</b> <b>Anillo intermedio</b>	MÁLAGA agosto de 2016
<b>Firma</b>		ESCALA: 1 / 1
		PLANO Nº 3



 <b>UNIVERSIDAD DE MÁLAGA</b> ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA INDUSTRIAL		
<b>"Estudio de la influencia de la humedad y tratamientos de consolidación en el comportamiento de la piedra calcarenítica"</b>		
<b>Nombre:</b> Marta Cruces Correa	<b>Pieza número 4</b> <b>Anillo intermedio</b>	MÁLAGA agosto de 2016
<b>Firma:</b>		ESCALA: 1 / 1
		PLANO Nº 4

**SOLIDWORKS Student Edition.**  
**Solo para uso académico.**



**SOLIDWORKS Student Edition.**  
Solo para uso académico.

		<b>UNIVERSIDAD DE MÁLAGA</b> ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA INDUSTRIAL		
<b>"Estudio de la influencia de la humedad y tratamientos de consolidación en el comportamiento de la piedra calcarenítica"</b>				
<b>Nombre:</b> Marta Cruces Correa	<b>Pieza número 5</b> <b>Brazo auxiliar</b>		MÁLAGA agosto de 2016	
<b>Firma</b>			ESCALA: 1 / 1	
			PLANO Nº 5	