



**Escuela Superior  
de Ingeniería y Tecnología**  
Universidad de La Laguna

Trabajo de Fin de Grado

INSTALACIÓN Y PUESTA A PUNTO DE UNA  
CÉLULA DE CARGA DE BAJA CAPACIDAD EN  
MÁQUINA DE ENSAYOS MECÁNICOS

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Alumno: Alejandro Pérez Domínguez

Tutores: José Miguel Cáceres Alvarado

Fernando Rivera López

Julio 2023



# **Título del proyecto**

Instalación y puesta a punto de una célula de carga de baja capacidad en  
máquina de ensayos mecánicos

---

**Autor**

**Alejandro Pérez Domínguez**

---

**DNI**

79073370-Z

---

**Correo electrónico**

alu0100820928@ull.edu.es

---

**Universidad**

**Universidad de La Laguna**

---

**Facultad**

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

---

**Dirección**

Camino San Francisco de Paula, s/n, 38200  
San Cristóbal de La Laguna, S/C de Tenerife,  
España

---

## **RESUMEN**

Los ensayos de propiedades mecánicas que se realizan en el laboratorio de materiales de la Universidad de La Laguna, siempre se han realizado utilizando una única célula de carga de alta capacidad.

A pesar de ello, uno de los equipos que dispone el laboratorio es una célula de baja capacidad de carga que nunca antes se ha empleado en ningún ensayo. La existencia de esta segunda célula plantea la pregunta de si existirá alguna discrepancia entre los valores que miden cada una de las células.

Es de gran importancia implementar la célula de baja carga y comprobar en diversos materiales que las medias obtenidas son adecuadas.

Se presenta así un estudio comparativo entre dos células de carga con distinta capacidad máxima: 5 y 50 kN para descubrir las posibles diferencias y equivalencias entre los valores de fuerza medidos con cada una de ellas y determinar si es posible, en qué casos es mejor cada una.

## **ABSTRACT**

The mechanical property tests done in the material laboratory of the La Laguna University, have always been done with a single high-capacity load cell.

However, one of the equipment available in the laboratory, it is a low-capacity load cell that has never been used before in any test. The fact that this second cell exists, raises the question of whether there will be any discrepancy between the measured values of each cells.

It is very important to implement the low load cell and also check if the obtained measurements in different materials are appropriated.

It is introduced a comparative study about two load cells with different maximum capacities: 5 kN and 50 kN to figure out all the possible differences and equivalencies between the force values measured with both of them and to determinate if it is possible, in which cases one is better over the other one.

# Índice General

1. Introducción.....	13
1.1 Marco.....	13
1.2 Objetivos.....	13
1.3 Alcance .....	13
2. Ensayos mecánicos .....	14
2.1 Máquina de ensayos mecánicos.....	14
2.2 Tipos de Células de Carga.....	15
2.3 Ensayos de flexión a tres puntos.....	16
3. Procedimiento de ensayo en los materiales de estudio.....	22
3.1 Baldosa cerámica.....	22
3.2 Piedra natural.....	29
3.3 Polímero plástico (PLA).....	32
4. Célula de Carga .....	35
4.1 Instalación de Célula de Carga de 5kN .....	35
5. Cálculos de ensayos a flexión.....	44
5.1 Cálculo de resistencia a flexión .....	44
5.2 Cálculos estadísticos.....	46
5.3 Resultados de ensayos con baldosas cerámicas.....	47
5.4 Resultados de ensayos con piedra natural .....	54
5.5 Resultados de ensayos con PLA.....	61
5.6 Resumen de comparación de los resultados entre los diferentes materiales .....	67
6. Conclusiones.....	70
7. Conclusions .....	71
8. Futuras líneas de trabajo .....	72

9. Glosario de términos.....	73
10. Bibliografía.....	74
11. Anexo I: Gráficas de ensayos con célula de alta carga.....	76
11.1 Gráficas de esfuerzo probetas de materiales cerámicos .....	76
11.2 Gráficas de esfuerzo probetas de piedra natural.....	80
11.3 Ensayos con probetas de PLA .....	86
12. Anexo II: Gráficas de ensayo con célula de baja carga.....	89
12.1 Gráficas de esfuerzo de probetas de materiales cerámicos.....	89
12.2 Gráficas de esfuerzo de probetas de piedra natural .....	93
12.3 Ensayos con probetas de PLA .....	100
13. Anexo III: Manual de instalación de la célula de baja carga.....	103
14. Anexo IV: Mediciones de las probetas.....	109
17.1 Probetas de piedra natural .....	109
17.2 Probetas de cerámica .....	110
17.3 Probetas de plástico (PLA).....	112
15. Anexo V: Secado de las probetas de piedra natural .....	114

# Índice de figuras

Figura 1 – Máquina universal de ensayos mecánicos SHIMADZU AUTOGRAPH AG-IS.....	14
Figura 2 – Accesorios de la máquina universal para flexión, compresión y tracción respectivamente .....	15
Figura 3a – Célula de carga de 50 kN .....	16
Figura 3b – Célula de carga de 5 kN .....	16
Figura 4 – Ejemplo de ensayo de flexión a tres puntos .....	17
Figura 5 – Curva característica de flexión [5] .....	18
Figura 6 – Probetas de cerámica antes de ensayo.....	22
Figura 7 – Tabla de número de probetas con espesor mayor o igual a 7,5mm recomendadas para ensayar [1].....	23
Figura 8a – Probeta de Cerámica (Cara anterior).....	23
Figura 8b – Probeta de Cerámica (Cara anterior en perspectiva).....	23
Figura 9 – Probetas cerámicas con diferentes patrones.....	24
Figura 10 – Probeta de cerámica siendo pesada .....	25
Figura 11 – Estufa de secado del laboratorio de materiales de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la ULL.....	25
Figura 12a – Probetas de cerámica enfriándose en el desecador.....	26
Figura 12b – Gel de Sílice deshumidificador en grano en el interior del desecador.....	26
Figura 13 – Tabla de medidas recomendadas en la normativa para ensayos a flexión de baldosas cerámicas [1].....	27
Figura 14 – Aplicación de la carga sobre la probeta con gomas para la transmisión de la carga [1].....	28

Figura 15 – Rotura de probeta cerámica.....	28
Figura 16 – Probetas de piedra natural seleccionadas para ensayar .....	29
Figura 17 – Probeta de piedra siendo pesada .....	30
Figura 18 – Probetas de piedra colocadas en la estufa de secado.....	30
Figura 20 – Rotura de probeta de piedra natural a flexión .....	32
Figura 19 – Ensayo de flexión de piedra natural .....	32
Figura 21 – Ejemplo de probeta de PLA en perspectiva .....	32
Figura 22 – Ejemplo de Probeta de PLA .....	32
Figura 23 – Muestreo de probetas de PLA antes de ensayo .....	33
Figura 24a – Ensayo de flexión de probeta de PLA .....	34
Figura 24b – Probeta de PLA con rotura por ensayo de flexión .....	34
Figura 25 – Máquina de ensayo universal con ambas células de carga instaladas.....	35
Figura 26 – Cable asociado a la célula de carga de 5 kN .....	36
Figura 27a – Conexión entre célula de carga y máquina universal de ensayos.....	36
Figura 27b – Tipo de conector de 7 pines empleado para el cable de las células de carga .....	36
Figura 28 – Conjunto de llaves Allen de diferentes tamaños .....	37
Figura 29a – Célula de carga de 5 kN con los tornillos de unión al plato de sujeción instalados .....	37
Figura 29b – Célula de carga de 5 kN con todos los tornillos retirados.....	37
Figura 29c – Plato de sujeción de la célula de carga de 5kN .....	38
Figura 30 – Célula de carga de 5 kN con el plato de sujeción instalado en ella .....	38
Figura 31 – Vista inferior de la Célula de Carga de 5kN instalada .....	39

Figura 32 – Célula de Carga de 5 kN después de su instalación.....	39
Figura 33a – Célula de carga de 5 kN con el cabezal protector .....	40
Figura 33b – Célula de carga de 5 kN sin el cabezal protector .....	40
Figura 34 – Cable de la célula de carga de 5 kN conectado a la máquina universal de ensayos .....	40
Figura 35 – Adaptadores de la célula de carga de 5 kN para flexión y compresión (inferior y superior respectivamente en la imagen).....	41
Figura 36 – Célula de Carga de 5 kN con el adaptador a flexión instalado .....	42
Figura 37 – Instalación del rodillo central para el ensayo a flexión a 3 puntos en la célula de carga de 5 kN.....	43
Figura 38 – Método para determinar el módulo elástico según la recomendación de la normativa [3] .....	45
Figura 39 – Curvas de Esfuerzo/Deformación para materiales casi-elásticos, semi-elásticos y plásticos [9].....	49
Figura 40 – Gráfica de Carga/Desplazamiento de célula de alta carga para los ensayos de flexión de probeta cerámica.....	50
Figura 41 - Gráfica de Carga/Desplazamiento de célula de baja carga para los ensayos de flexión de probeta cerámica.....	50
Figura 42 – Secciones de las curvas Fuerza/Desplazamiento para el cálculo de la pendiente de la zona elástica de célula de alta carga en cerámica.....	51
Figura 43 – Secciones de las curvas Fuerza/Desplazamiento para el cálculo de la pendiente de la zona elástica de célula de baja carga en cerámica.....	52
Figura 44 – Comparación de las curvas de las probetas cerámica ensayadas con la célula de alta carga.....	53
Figura 45 – Comparación de las curvas de las probetas de cerámica ensayadas con la célula de baja carga.....	53

Figura 46 – Gráfica de Carga/Desplazamiento de célula de alta carga para los ensayos de flexión de probeta de piedra natural .....	57
Figura 47 – Gráfica de Carga/Desplazamiento de célula de baja carga para los ensayos de flexión de probeta de piedra natural .....	57
Figura 48 – Secciones de las curvas Fuerza/Desplazamiento para el cálculo de la pendiente de la zona elástica de célula de alta carga en piedra natural .....	58
Figura 49 – Secciones de las curvas Fuerza/Desplazamiento para el cálculo de la pendiente de la zona elástica de célula de baja carga en piedra natural .....	59
Figura 50 – Comparación de las curvas de las probetas de piedra natural ensayadas con la célula de alta carga.....	60
Figura 51 – Comparación de las curvas de las probetas de piedra natural ensayadas con la célula de baja carga.....	60
Figura 52 – Gráfica de Carga/Desplazamiento de célula de alta carga para los ensayos de flexión de probeta de PLA .....	63
Figura 53 – Gráfica de Carga/Desplazamiento de célula de baja carga para los ensayos de flexión de probeta de PLA .....	63
Figura 54 – Secciones de las curvas Fuerza/Desplazamiento para el cálculo de la pendiente de la zona elástica de célula de alta carga en PLA.....	64
Figura 55 – Secciones de las curvas Fuerza/Desplazamiento para el cálculo de la pendiente de la zona elástica de célula de baja carga en PLA.....	65
Figura 56 – Comparación de las curvas de las probetas de PLA ensayadas con la célula de alta carga .....	66
Figura 57 – Comparación de las curvas de las probetas de PLA ensayadas con la célula de baja carga .....	66

## Índice de tablas

Tabla 1 – Resultados de probetas de cerámica de la célula de alta carga.....	47
Tabla 2 – Resultados de probetas de cerámica de la célula de baja carga.....	47
Tabla 3 – Comparativa de los resultados promedios entre células de carga de probetas de cerámica.....	54
Tabla 4 – Resultados de probetas de piedra natural de la célula de alta carga.....	55
Tabla 5 – Resultados de probetas de piedra natural de la célula de baja carga.....	56
Tabla 6 – Comparativa de los resultados promedios entre células de carga de probetas de piedra natural .....	61
Tabla 7 – Resultados de probetas de PLA de la célula de alta carga .....	61
Tabla 8 – Resultados de probetas de PLA de la célula de baja carga.....	62
Tabla 9 – Comparativa de los resultados promedios entre células de carga de probetas de piedra natural .....	67
Tabla 10 – Resultados promedios de los valores del MOR de ambas células de carga .	67
Tabla 11 – Resultados promedios de los valores de carga máxima de ambas células de carga.....	68
Tabla 12 – Resultados promedios de los valores de deformación máxima de ambas células de carga.....	68
Tabla 13 – Resultados promedios de los valores del módulo de elasticidad a flexión de ambas células de carga .....	69

# **1. Introducción**

## **1.1 Marco**

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) se crea a partir de la adquisición de una célula de carga de 5 KN por parte del grupo de Ingeniería de Materiales de la Universidad de La Laguna (ULL).

## **1.2 Objetivos**

Se ha definido como objetivo de este trabajo, determinar si existen discrepancias en la lectura de los datos de fuerza entre las dos células de carga disponibles en el laboratorio, la célula de 50 kN que es la única que se ha empleado con regularidad, y la célula de carga de 5 kN, que es una célula nueva que hasta la realización de este proyecto nunca se había utilizado.

En caso de existir dichas discrepancias en la lectura, será posible distinguir y estudiar la diferencia de comportamientos de ambas células y comprobar si la célula de 5 kN es más adecuada para los ensayos de baja carga.

## **1.3 Alcance**

Dependiendo de los resultados que se obtengan en los diferentes ensayos, es posible profundizar más en los diferentes usos que podremos dar a la célula de carga de 5 kN y a la mejora de los resultados en ensayos que ésta podrá proporcionar.

En cambio, si los resultados de la célula de carga fueran incorrectos o significativamente similares a la célula de 50 kN, el trabajo concluiría con que no existe mejora real en el uso de una segunda célula de carga en la máquina de ensayos mecánicos.

## 2. Ensayos mecánicos

### 2.1 Máquina de ensayos mecánicos

Durante el desarrollo del trabajo, se ha empleado la máquina universal de ensayos mecánicos SHIMADZU AUTOGRAPH AG-IS (Figura 1) que se encuentra ubicada en el aula 1-14 de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna.



*Figura 1 – Máquina universal de ensayos mecánicos SHIMADZU AUTOGRAPH AG-IS*

Se denomina máquina universal ya que se puede configurar para diferentes ensayos (ensayos a flexión, tracción y compresión), para ello dispone de varios accesorios que se incorporan según el tipo y necesidades de los ensayos (Figura 2) [4].



Figura 2 – Accesorios de la máquina universal para flexión, compresión y tracción respectivamente

Se trata de una máquina con un mecanismo electromecánico de tornillo sin fin que mueve el bastidor verticalmente a una velocidad y fuerza controlada mediante los parámetros introducidos a través del software *Trapezium*. Es posible variar estos parámetros en el software según el tipo de ensayo o material a ensayar ya que posee bastante flexibilidad a la hora de programar todo el ensayo y controlar cómo se realizan. Durante los ensayos, las medidas obtenidas se muestran en la pantalla a tiempo real, mientras se forma un gráfico con las magnitudes previamente programadas. El software permite finalizar el ensayo de la probeta de tres maneras diferentes, al llegar a una magnitud preseleccionada, al sobrepasar una determinada carga de seguridad o al detectar la rotura de la probeta.

Una vez terminado el ensayo, los datos de todas las probetas ensayadas se guardan en un archivo de texto para su posterior estudio.

## 2.2 Tipos de Células de Carga

La célula de carga es el dispositivo de la máquina universal que se encarga de la toma de medidas de la fuerza aplicada durante el ensayo y reflejarlas en el software. Se emplearán dos tipos: una con capacidad máxima de 50 kN, modelo SFL-50KNNAG (Figura 3a), y otra con capacidad máxima de 5 kN, modelo SLBL-5KN (Figura 3b), ambas de la marca Shimadzu. Al comparar ambas células, los ensayos estarán limitados a esfuerzos inferiores a 5 KN, para poder obtener valores equiparables entre las medidas realizadas.



*Figura 3a – Célula de carga de 50 kN*



*Figura 3b – Célula de carga de 5 kN*

Entre las diferentes configuraciones que se pueden emplear en la máquina de ensayos, en el presente estudio únicamente se ha utilizado la correspondiente a la realización de ensayos a flexión a tres puntos.

Para estos ensayos, se empleará el accesorio del puente de carga, que consta del punzón con el rodillo central el que se acopla a ambas células.

Por otro lado, la medición de la flecha o desplazamiento, se obtiene del desplazamiento del bastidor que es el mismo durante los ensayos de ambas células.

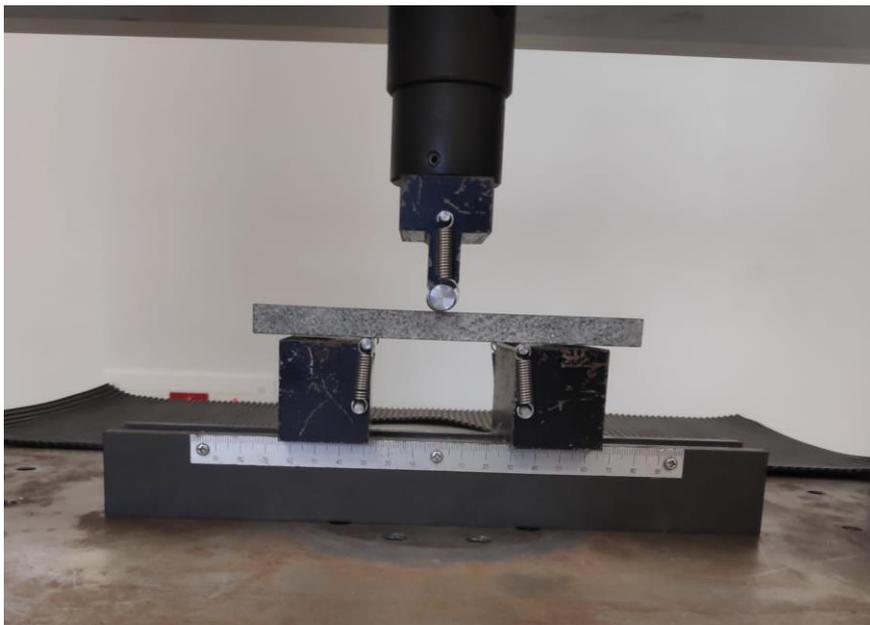
La célula de carga de 5 kN es un accesorio algo complejo de montar y se carece de experiencia previa, por ello se ha realizado un manual de ayuda para facilitar una correcta instalación, disponible en el Anexo III de esta memoria.

### **2.3 Ensayos de flexión a tres puntos**

En los ensayos a flexión de tres puntos se somete a la probeta a una fuerza aplicada en su zona central mientras se encuentra apoyada en sus dos extremos longitudinales. Para el desarrollo de estos ensayos se emplean como referencia las normativas correspondientes a cada uno de los materiales del estudio:

- Cerámica: UNE-EN ISO 10545-4:2019 (*Determinación de la resistencia a la flexión y de la fuerza de rotura*) [1]
- Piedra natural: UNE-EN 12372:2022 (*Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada*) [2]
- Polímero plástico, ácido poliláctico (PLA): UNE-EN ISO 178:2020 (*Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión*) [3]

Para cada una de las células de carga se colocan como accesorios tres rodillos, dos de los cuales se emplean como puntos de apoyos y un tercer rodillo central que, colocado en el puente de carga, será el encargado de aplicar la carga solicitada.



*Figura 4 – Ejemplo de ensayo de flexión a tres puntos*

En la figura 4 se observa los accesorios para flexión disponibles en el laboratorio, los tres rodillos ya comentados y además una base en la que se aprecia una división en milímetros para mejor cálculo de la separación de los rodillos de apoyo. Al estar limitados por el equipamiento, siempre se emplean los mismos para los diferentes ensayos de todos los materiales y no se emplearán rodillos de diferentes diámetros.

Cada uno de los ensayos a flexión será ligeramente diferente para cada material y se detallan los procedimientos específicos de ellos en los puntos respectivos de este documento.

De este ensayo se obtiene una curva característica (Figura 5) que está en términos de tensión vs deformación, donde se puede apreciar las distintas zonas de la gráfica.

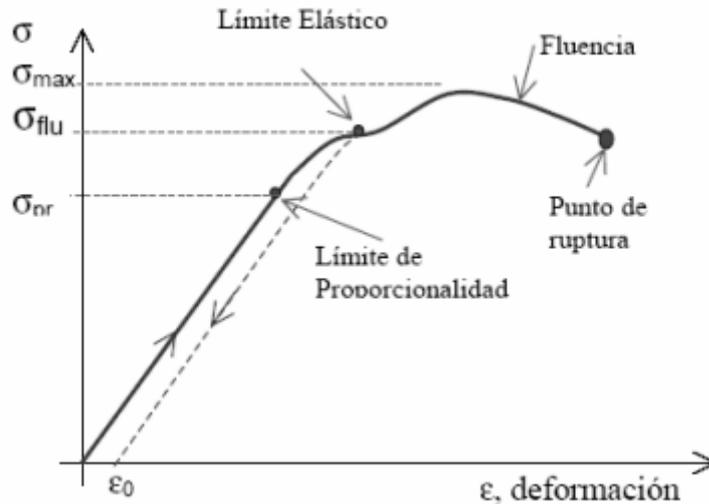


Figura 5 – Curva característica de flexión [5]

En la figura 5 se puede identificar donde se encuentra el límite elástico, que representa la frontera entre la zona elástica y la zona plástica del material.

La zona elástica es la primera región delimitada en la gráfica, donde el material que es sometido a un determinado esfuerzo se deforma, al suprimir el esfuerzo, el material recupera su forma original revirtiendo esa deformación.

En esta zona el material se comporta conforme a la ley de Hooke, que establece que la deformación de un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada e inversamente proporcional a su sección transversal. Según esta ley obtenemos que [6]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

Donde:

$\sigma$  es el esfuerzo aplicado, expresado en megapascales (MPa).

$E$  es el módulo elástico del material, expresado en megapascales (MPa).

$\varepsilon$  es la deformación unitaria con respecto al esfuerzo aplicado, que es adimensional.

$\Delta L$  es el alargamiento producido por la deformación, expresado en milímetros (mm).

$L_0$  es la longitud inicial antes de aplicar el esfuerzo, expresado en milímetros (mm).

Esta ley se cumple hasta alcanzar el llamado límite de proporcionalidad, entre ese punto y el límite elástico existirá una deformación permanente residual al suprimir el esfuerzo ya que el material empieza a comportarse de forma plástica. Llegados a ese punto, no es posible revertir la deformación en su totalidad, pero sí parcialmente. En esta zona de la gráfica, la relación entre  $\sigma$  y  $\varepsilon$  deja de ser tan simple, aunque la deformación sufrida no será mayor a una deformación residual que por convención, se establece en  $\varepsilon_0 < 10^{-4}$ .

A partir del límite elástico, se encuentra la zona plástica, en esta zona al liberar al material de un esfuerzo sometido, no es posible revertir la deformación sufrida, lo que provoca cambios permanentes en el material y sus dimensiones.

Si el esfuerzo continúa aumentando a partir de este punto, es posible llegar a una zona de ruptura donde el material acabará cediendo y romperá, que es lo que se denomina como punto de ruptura.

Entre ese punto y el límite elástico, es posible encontrar, dependiendo del material, una zona de fluencia que se caracteriza por ser posible deformar el material con un esfuerzo menor al que se necesita para llegar a dicha zona. Lo que significa que, en estos ensayos, es posible obtener un esfuerzo máximo que no coincida con el esfuerzo del punto de ruptura del material. [7]

La finalidad de estos ensayos es obtener los valores de los siguientes parámetros para cada una de las probetas:

### **Fuerza máxima**

Es la carga máxima que es aplicada a la probeta de ensayo por el punto medio hasta su ruptura.

### **Esfuerzo máximo a flexión**

Otro parámetro importante que es posible calcular es el esfuerzo máximo a flexión, que, por sus siglas en inglés, se denomina MOR (Modulus of Rupture).

Este valor, corresponde con el esfuerzo máximo que experimenta la probeta en el ensayo que para una probeta de sección rectangular, corresponde a [3]:

$$MOR = \frac{3 \cdot F_{m\acute{a}x} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2)$$

Donde:

MOR es el valor de esfuerzo máximo de flexión, expresado en megapascuales (MPa).

$F_{m\acute{a}x}$  es el valor máximo de carga, expresado en newtons (N).

L es la longitud entre los rodillos de apoyo, expresada en milímetros (mm).

b es la anchura de la probeta, expresada en milímetros (mm).

h es el espesor de la probeta, expresado en milímetros (mm).

### **Deformación máxima a flexión**

Es la variación máxima de la longitud un elemento de la superficie exterior de la probeta en el punto de aplicación de la carga. Para obtener este valor, se emplea la siguiente ecuación [3]:

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot s_{m\acute{a}x} \cdot h}{L^2} \quad (3)$$

Donde:

$\varepsilon_f$  es la deformación máxima, expresada en porcentaje

$s_{m\acute{a}x}$  es el desplazamiento máximo del bastidor, expresado en milímetros (mm).

h es el espesor de la probeta, expresado en milímetros (mm).

L es la distancia entre los rodillos de apoyo, expresada en milímetros (mm).

### **Módulo de elasticidad a flexión**

Este parámetro, se calcula con los valores que se obtienen dentro de la zona elástica mediante la siguiente ecuación [8]:

$$E_f = \frac{L^3 \cdot m}{4 \cdot b \cdot h^3} \quad (4)$$

Donde:

$E_f$  es el módulo de elasticidad a flexión, expresado en megapascales (MPa).

L es la distancia entre los rodillos de apoyo, expresada en milímetros (mm).

m es la pendiente de la curva de la zona elástica.

b es la anchura de la probeta, expresada en milímetros (mm).

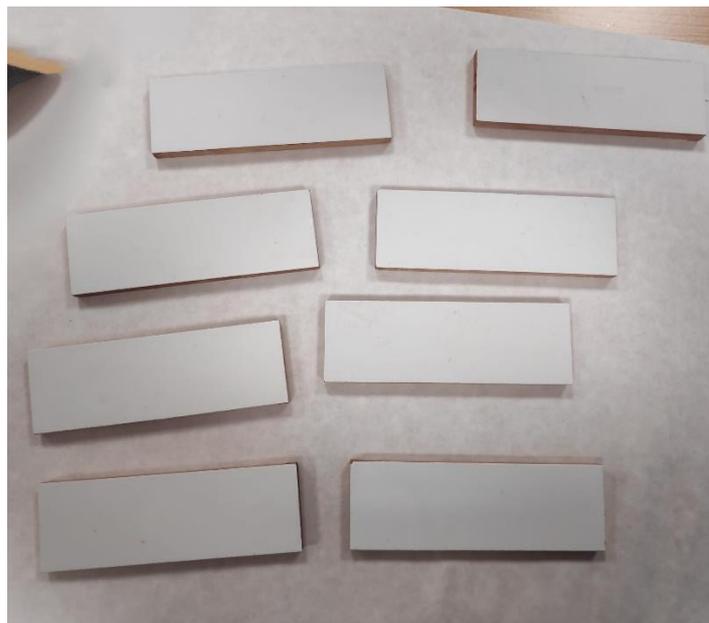
h es el espesor de la probeta, expresado en milímetros (mm).

### 3. Procedimiento de ensayo en los materiales de estudio

#### 3.1 Baldosa cerámica

Para realizar los ensayos se emplean probetas de baldosas cerámicas recortadas con unas dimensiones generales 150x50x10 mm de longitud. Las dimensiones de cada una de las probetas ensayadas están recogidas en una tabla en el Anexo IV: Mediciones de las probetas. Debido a la limitación de materiales, no es posible obtener probetas de ensayo cerámicas de las dimensiones recomendadas por la normativa de aplicación (UNE-EN ISO 10545-4:2019, *Determinación de la resistencia a la flexión y de la fuerza de rotura*).

Para cada ensayo con cada célula de carga, se han seleccionados 8 probetas (Figura 6) de acuerdo con esa normativa.



*Figura 6 – Probetas de cerámica antes de ensayo*

Para la elección de ese número de probetas, la norma adjunta una tabla (Figura 7) donde recoge el número mínimo de probetas para el ensayo además del número mínimo de resultados aceptables según el espesor de las baldosas. Perteneciendo las probetas cerámicas empleadas, al primer grupo de la tabla.

Área máxima $A$ $\text{mm}^2$	Número de probetas para ensayo	Número total de baldosas	Número total de probetas	Número mínimo de resultados aceptables
$2\,500 < A \leq 40\,000$	1	7	7	5
$40\,000 < A \leq 360\,000$	1	7	7	5
$A > 360\,000$	1	3	3	3

*Figura 7 – Tabla de número de probetas con espesor mayor o igual a 7,5mm recomendadas para ensayar [1]*

Como se puede observar, fueron 8 las probetas seleccionadas para cada ensayo a pesar de que la normativa recomienda 7, se ha decidido así debido a que las probetas de cerámica son bastante frágiles y por ello se ha considerado que era más ventajoso trabajar sobre una mayor holgura que la recomendada.

Cada una de las probetas presenta una de sus caras lisa y la cara anterior posee unas rugosidades onduladas como se muestran en las figuras 8a y 8b.



*Figura 8a – Probeta de Cerámica (Cara anterior)*



*Figura 8b – Probeta de Cerámica (Cara anterior en perspectiva)*

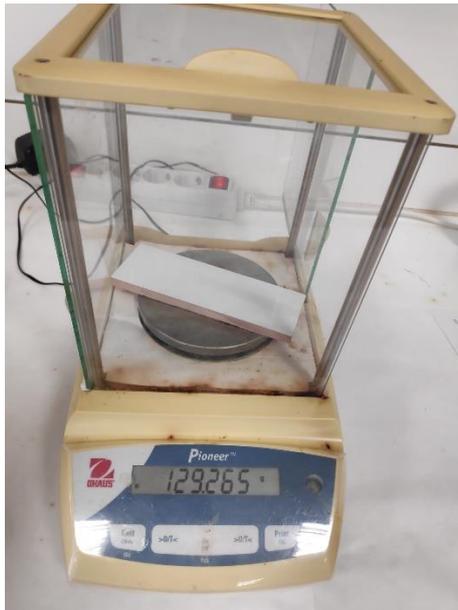
Además, las probetas se han seleccionado según la semejanza de estas rugosidades para asegurar la mayor homogeneidad posible entre probetas. En la figura 9 se puede observar dos probetas con diferente patrón en sus ondulaciones.



*Figura 9 – Probetas cerámicas con diferentes patrones*

Como se puede apreciar en la figura 9, el patrón ondulado no cruza enteramente a las baldosas, corresponde a un patrón diferente a las figuras 8a y 8b, debido a que son las secciones exteriores de una baldosa mayor. Para buscar la homogeneidad en las probetas, en los ensayos se emplearán solamente las baldosas que provengan de la zona interior de la baldosa de origen, para así obtener los patrones como en las dos primeras figuras.

Posteriormente a la elección de probetas, como indica la normativa, se cepillan para eliminar impurezas y seguidamente se procede a medir la masa de cada una de ellas para iniciar el registro de sus medidas antes del secado (Figura 10). El valor de estas medidas se encuentra recogido en el Anexo IV: Mediciones de las probetas.



*Figura 10 – Probeta de cerámica siendo pesada*

El secado de las probetas se realizó en la estufa que dispone el laboratorio de materiales, que, según la normativa, se programa a 105°C y se deben dejar aproximadamente 24h (Figura 11).



*Figura 11 – Estufa de secado del laboratorio de materiales de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la ULL*

Al día siguiente, el proceso de preparación de las probetas ya casi ha finalizado a falta de realizar las últimas mediciones de peso además de las medidas geométricas de las probetas. Debido a que el laboratorio está ubicado en una zona con bastante humedad en el ambiente, las probetas sacadas de la estufa se colocan en un recipiente de secado (Figuras 12a y 12b) para evitar que se humedezcan en la medida de lo posible antes de su posterior ensayo.



*Figura 12a – Probetas de cerámica enfriándose en el desecador*



*Figura 12b – Gel de Sílice deshumidificador en grano en el interior del desecador*

Ya tomadas las medidas de todas las probetas a ensayar, es necesario preparar los rodillos en la máquina de ensayo universal. Debido al equipamiento disponible en el laboratorio, no se ha podido seguir estrictamente este apartado de la normativa ya que en la preparación de los rodillos la norma exige determinados diámetros para cada rodillo además de un recubrimiento de goma para una correcta transmisión de la carga. Los ensayos se realizan con los diámetros que se disponen y sin recubrimiento de goma como se observa en la figura 14.

La normativa recomienda una serie de medidas recogidas en la figura 13 que se emplean para la elección de la distancia de separación de los rodillos:

Longitud de la baldosa	Diámetro del rodillo	Grosor del caucho	Distancia entre los puntos de apoyo y los bordes de la baldosa
$L$ mm	$d$ mm	$t$ mm	$l_1$ mm
$18 \leq L < 48$	$5 \pm 1$	$1 \pm 0,2$	$2 \pm 1$
$48 \leq L < 95$	$10 \pm 1$	$2,5 \pm 0,5$	$5 \pm 3$
$L \geq 95$	$20 \pm 1$	$5 \pm 1$	$10 \pm 5$

Figura 13 – Tabla de medidas recomendadas en la normativa para ensayos a flexión de baldosas cerámicas [1]

Según la distancia recomendada para las baldosas mayores a 95 mm, como es el caso de los ensayos realizados, es necesario dejar 10 mm por cada extremo de la baldosa, como las probetas miden 150 mm, significa que la distancia de separación entre rodillos empleada es de 130 mm.

Además de eso, se colocan en la máquina de ensayo universal y se selecciona el método de ensayo adecuado para la flexión de las probetas cerámicas según la normativa. En este caso se indica a la prensa que incremente el esfuerzo de ensayo en  $1 \text{ N/mm}^2$  cada segundo y se calcula el valor de aplicación de la fuerza con las ecuaciones facilitadas por la normativa:

$$R = \frac{3Fl_2}{2Bh^2} = \frac{3S}{2h^2} \quad (5)$$

Donde:

R es el incremento del esfuerzo por segundo (1 MPa/s)

F es la carga de rotura expresada en Newtons.

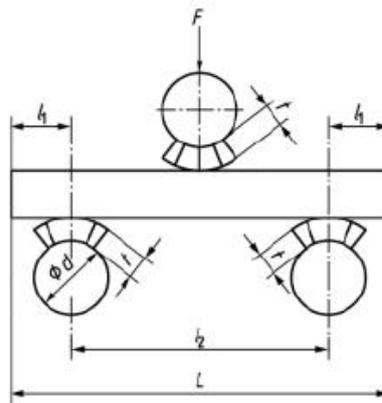
$l_2$  es la distancia en milímetros entre los rodillos

B es la anchura de la probeta en milímetros

h es el espesor mínimo expresado en milímetros de la probeta de la sección de rotura.

Para las baldosas empleadas, el valor de la carga ( $F$ ) es de 153,84 N/min. Este valor ha sido calculado con la fórmula anterior, despejando el valor  $F$ . De esta manera, se ha convertido la velocidad de 1 MPa/s en N/min.

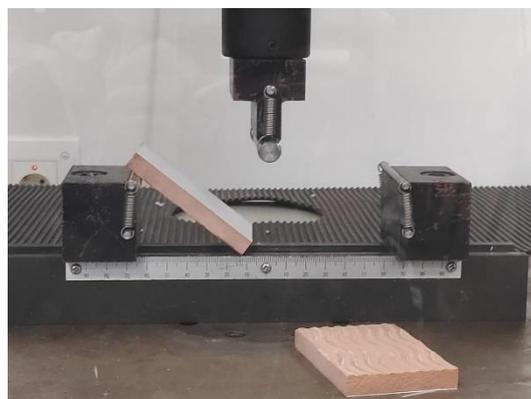
Para el paso siguiente, después de configurar el ensayo en el software de la máquina universal de ensayos, se colocan las baldosas en los rodillos de apoyo, la cara lisa hacia arriba para evitar ensayar las probetas en posiciones diferentes que puedan generar mayor dispersión en los datos.



**Leyenda**

- $d$  Diámetro del rodillo
- $L$  Lado largo de la baldosa
- $l_1$  Distancia entre los puntos de apoyo y los bordes de la baldosa
- $l_2$  Distancia entre los rodillos de apoyo
- $t$  Espesor de la goma

*Figura 14 – Aplicación de la carga sobre la probeta con gomas para la transmisión de la carga [1]*



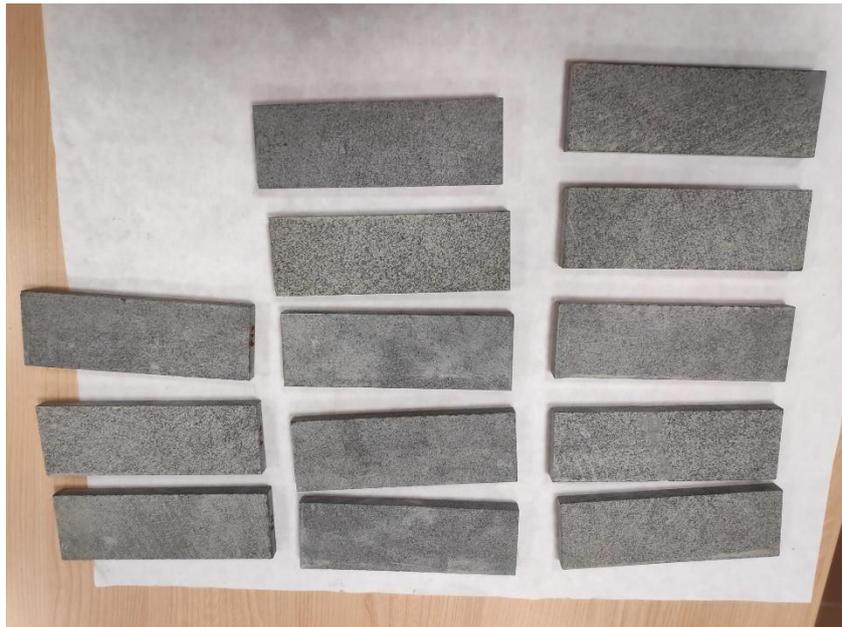
*Figura 15 – Rotura de probeta cerámica*

### 3.2 Piedra natural

En el caso de los ensayos con piedra natural, se han empleado probetas de piedra cortadas con unas dimensiones de 150x50x10 mm y se ha seguido las recomendaciones de la norma UNE-EN 12372:2022 (*Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada*).

Las dimensiones de las probetas disponibles en el laboratorio no concuerdan con las recomendadas por la normativa, pero debido a la limitación de probetas de piedra, se ha decidido emplear las que se disponen.

Respecto al número de probetas, la normativa recomienda como mínimo 10 muestras de un lote homogéneo. Se seleccionaron 13 probetas (Figura 16) para cada tanda de ensayos, siempre descartando aquellas que presentaran alguna imperfección visible.



*Figura 16 – Probetas de piedra natural seleccionadas para ensayar*

Después de la selección de probetas, se procede con la medición de la masa de cada una de ellas en la balanza del laboratorio (Figura 17). Los resultados obtenidos se encuentran en el Anexo IV: Mediciones de las probetas.



*Figura 17 – Probeta de piedra siendo pesada*

Posteriormente, se empieza con el secado de las probetas que, por recomendación de la normativa, debe hacerse en un horno o estufa a 70 °C (Figura 18) durante el tiempo suficiente para que la diferencia de las masas entre dos pesadas realizadas con 24 horas de diferencia, no sea superior al 0,1 %.



*Figura 18 – Probetas de piedra colocadas en la estufa de secado*

En las probetas ensayadas, la duración del secado, ha sido de una semana aproximadamente, como se puede observar en más detalle en el Anexo V: Secado de piedra natural.

Una vez alcanzada la estabilidad en masa de las probetas, el ensayo debe realizarse en un plazo no superior a 24 horas. Antes de empezar el ensayo, se han medido y anotado todos los datos geométricos de cada una de las probetas.

Se inicia la preparación del ensayo que debe realizarse siguiendo las indicaciones de la normativa, que recomienda una distancia de separación de los rodillos igual a cinco veces el espesor de las probetas, es decir, a 50mm de distancia. Además, la velocidad de aplicación de la carga debe incrementarse a una velocidad uniforme de 0,25 MPa/s hasta que la probeta rompa. Para ello, se debe hallar la velocidad de carga mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{2abh^2}{3l} (N/s) \quad (6)$$

Siendo:

- V la velocidad de carga en Newtons por segundo (N/s)
- a la carga en MPa/s
- b el ancho de la probeta en milímetros
- h el espesor de la probeta en milímetros
- l la distancia de los rodillos en milímetros

Este valor de velocidad resulta en 1117 N/min según las dimensiones de las probetas a ensayar.

Por último, después de programar el software de la máquina de ensayo universal con esas instrucciones, se comienza el ensayo de todas las probetas de piedra natural (Figura 19) hasta que rompan (Figura 20).

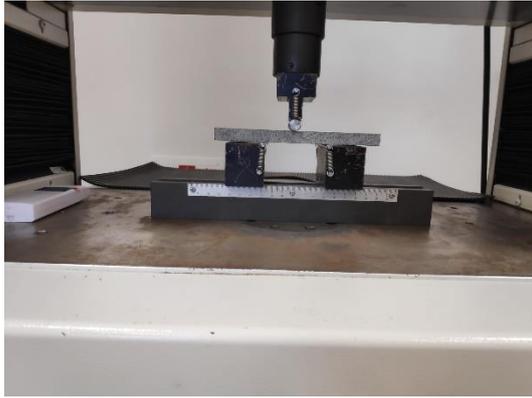


Figura 19 – Ensayo de flexión de piedra natural

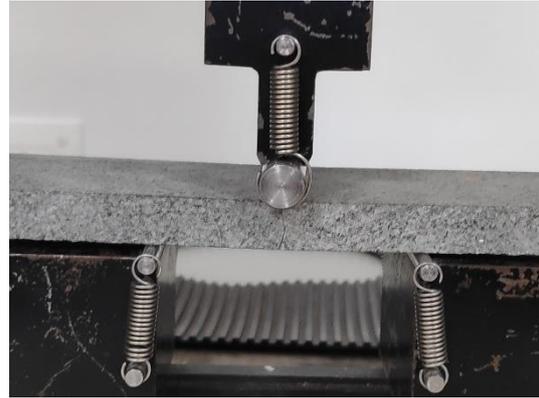


Figura 20 – Rotura de probeta de piedra natural a flexión

### 3.3 Polímero plástico (PLA)

Los ensayos a flexión para materiales plásticos (PLA) se han realizado de acuerdo a la normativa UNE-EN ISO 178:2020 (*Determinación de las propiedades de flexión*). Para ello, se han empleado probetas de PLA de 80x10x4 mm de tamaño (Figuras 21 y 22), que es la geometría recomendada por la normativa.

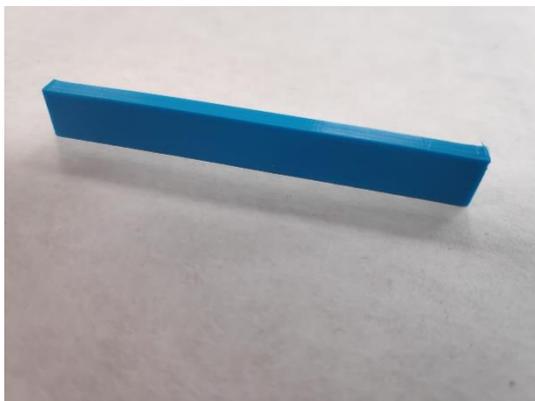


Figura 21 – Ejemplo de probeta de PLA en perspectiva

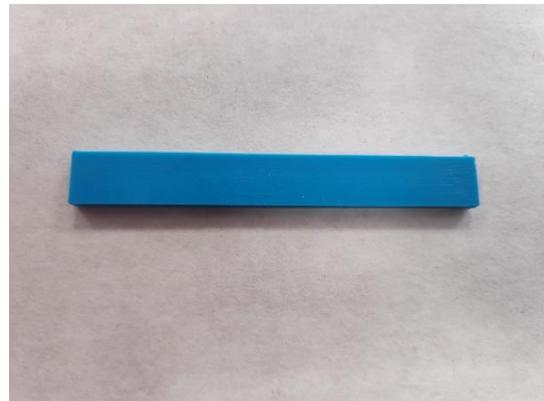


Figura 22 – Ejemplo de Probeta de PLA

También, de acuerdo a la norma, se han seleccionado 6 probetas para cada tanda de ensayos, que es un muestreo superior a las 5 recomendadas (Figura 23). Se elije aumentar el número de la cantidad recomendada debido a que es preferible tener más resultados aceptables en caso de tener numerosas desviaciones de tendencia.

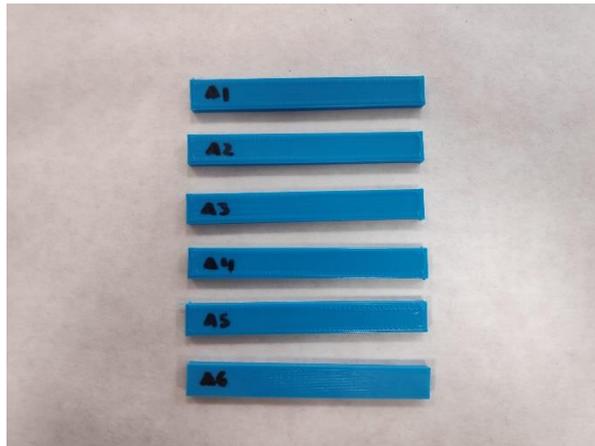


Figura 23 – Muestreo de probetas de PLA antes de ensayo

Al contrario que en los ensayos de la cerámica y la piedra natural, no se requiere de una preparación previa al ensayo de las probetas, solamente se toman las medidas exactas de ellas para su estudio posterior y se presentan para el comienzo de los ensayos. Estas medidas se recogen en el Anexo IV: Mediciones de las probetas.

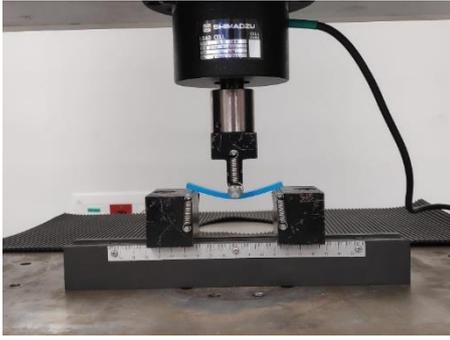
Para ello, debe hallarse la distancia de separación de los rodillos de apoyo mediante la siguiente ecuación:

$$L = (16 \pm 1)\bar{h} \quad (7)$$

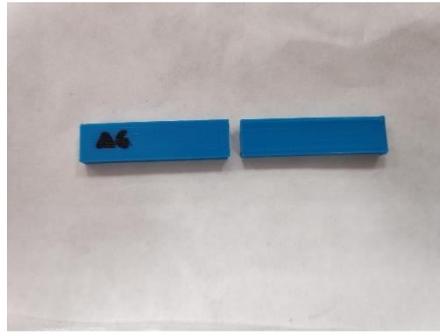
Siendo  $\bar{h}$  el espesor de la probeta y L la distancia de separación de los rodillos. Por lo que para la probeta recomendada serían 64 mm de longitud.

Respecto a la velocidad de aplicación de la carga, aunque la normativa recomienda una aplicación de una primera carga para asentar y asegurar la acomodación de las probetas, no es de aplicación a los ensayos realizados. La velocidad de ensayo se aplica a un valor constante y sin interrupción, de acuerdo al método A de la norma.

Una vez configurado el software *Trapezium* con los valores correspondientes, puede iniciarse el ensayo (Figura 24a) hasta que se produzca la rotura de la probeta (Figura 24b).



*Figura 24a – Ensayo de flexión de probeta de PLA*



*Figura 24b – Probeta de PLA con rotura por ensayo de flexión*

## 4. Célula de Carga

### 4.1 Instalación de Célula de Carga de 5kN

Debido a la diferencia que existe a la hora de instalar la célula de 5kN con respecto a la célula de alta carga, además de por ser una célula nada empleada a fecha de realización de este estudio, se ha considerado crear un apartado para guiar en la instalación de esta célula de carga.

Para empezar el montaje, es necesario retirar todos los accesorios que se encuentren en la célula de alta carga. Como el lugar donde se colocan ambas células es diferente, no se requiere retirar la célula de alta carga para instalar la de baja carga, como se aprecia en la figura 25.



*Figura 25 – Máquina de ensayo universal con ambas células de carga instaladas*

La célula de 50 kN se instala en la parte superior del bastidor, mientras que la célula de 5 kN, se presenta en la parte inferior.

Posteriormente de la retirada de los accesorios, se debe retirar el cable que conecta la célula de alta carga con la máquina universal de ensayos mecánicos (Figura 26), ya que cada célula dispone de su cable específico. En caso de emplear un cable de una célula

en la otra, el software de la máquina de ensayos entenderá que está conectada la célula asociada a ese cable, por lo que no detectará correctamente la célula. Esto es debido a que el hardware de cada cable es diferente y no se deben mezclar.



*Figura 26 – Cable asociado a la célula de carga de 5 kN*

Este cable conecta directamente la máquina universal de ensayo con la célula de carga mediante una conexión de 7 pines con seguro, para evitar la desconexión accidental (Figuras 27a y 27b).



*Figura 27a – Conexión entre célula de carga y máquina universal de ensayos*



*Figura 27b – Tipo de conector de 7 pines empleado para el cable de las células de carga*

Una vez retirado el cable de conexión de la célula de carga de 50 kN, se procede con la instalación de la célula de 5 kN. Para ello, se emplean diferentes tipos de llaves Allen (Figura 28).



*Figura 28 – Conjunto de llaves Allen de diferentes tamaños*

Con ellas se procede a atornillar el plato de sujeción de la célula de carga de 5 kN a ella, siendo necesario primero, retirar los tornillos que la célula presente en caso de que sea necesario (Figuras 29a, 29b y 29c)



*Figura 29a – Célula de carga de 5 kN con los tornillos de unión al plato de sujeción instalados*



*Figura 29b – Célula de carga de 5 kN con todos los tornillos retirados*



*Figura 29c – Plato de sujeción de la célula de carga de 5kN*

El plato se presenta encima de la célula y se atornilla a la célula en los orificios interiores, como se puede apreciar en la figura 30.



*Figura 30 – Célula de carga de 5 kN con el plato de sujeción instalado en ella*

Preparada ya la célula para su instalación, se presenta en el orificio de la parte inferior del bastidor de la máquina universal de ensayos para comenzar a atornillar el plato de sujeción al brazo. Al ser 4 tornillos, se recomienda empezar a atornillar de manera diagonal, es decir, al atornillar el primero, se debe colocar como segundo tornillo, el

situado en la posición más alejada del segundo. De esta manera se realiza una correcta y segura sujeción a la hora de la instalación (Figura 31).



*Figura 31 – Vista inferior de la Célula de Carga de 5kN instalada*

Una vez instalada, la célula quedaría como se muestra en la figura 32. Es importante tener en cuenta la posición en la que quedaría el cable de la célula de carga una vez instalada, ya que podría estorbar en los ensayos si éste se encontrara en una posición incómoda. Por ello, no es necesario que la posición de la célula sea igual que en la figura 32, se recomienda colocarla teniendo en cuenta la posición final del cable.



*Figura 32 – Célula de Carga de 5 kN después de su instalación*

Hay que tener en cuenta de que, en la base de la célula de carga, es posible encontrarla con un cabezal protector que debe retirarse una vez instalada para poder colocar los accesorios (Figuras 33a y 33b).



*Figura 33a – Célula de carga de 5 kN con el cabezal protector*



*Figura 33b – Célula de carga de 5 kN sin el cabezal protector*

Por último, se conecta la célula a la máquina universal de ensayos teniendo en cuenta lo explicado con anterioridad. Se emplea el cable asociado a la célula de carga de 5 kN y se asegura con los tornillos (Figura 34).



*Figura 34 – Cable de la célula de carga de 5 kN conectado a la máquina universal de ensayos*

Una vez conectado, ya es posible colocar los accesorios a la célula de carga y encender la máquina universal para comenzar con los ensayos.

Para ello, la célula de 5 kN posee dos adaptadores, uno para flexión y otro para compresión (Figura 35). A fecha de este trabajo, el adaptador de tracción no se encuentra en el laboratorio, como se ha comentado con anterioridad.



*Figura 35 – Adaptadores de la célula de carga de 5 kN para flexión y compresión (inferior y superior respectivamente en la imagen)*

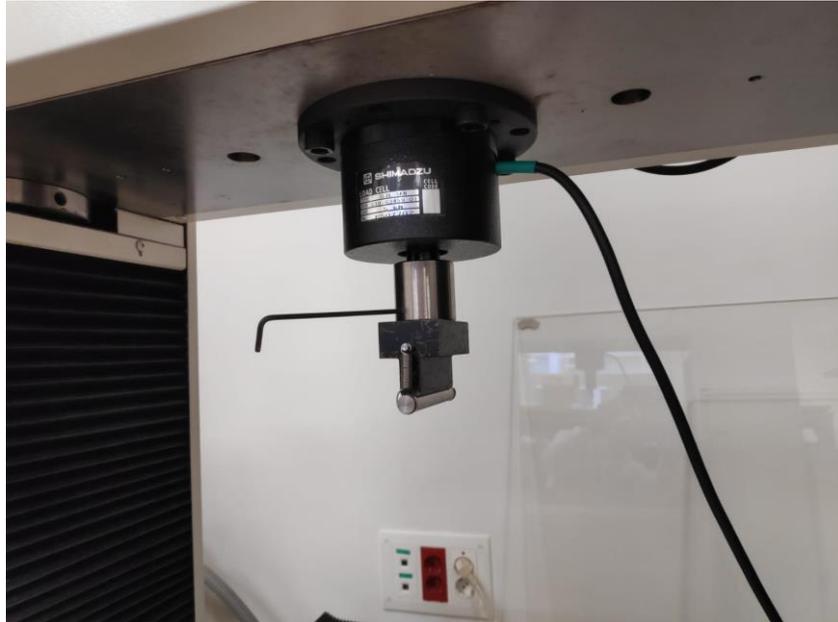
A la hora de colocar estos adaptadores, es bastante importante no realizar un esfuerzo a torsión excesivo al enroscarlos en la célula, ya que puede llevar a errores de medida e incluso la rotura de la propia célula. El manual especifica un valor máximo de 46 N de esfuerzo a torsión. En la figura 36 se aprecia como quedaría la célula después de instalar uno de los adaptadores.



*Figura 36 – Célula de Carga de 5 kN con el adaptador a flexión instalado*

Después de instalar el adaptador, el siguiente paso es colocar los accesorios necesarios para realizar las pruebas o ensayos de la máquina universal, teniendo en cuenta siempre el valor máximo de torsión permitida para evitar dañar la célula. El adaptador posee un tornillo en un lateral cuya finalidad es realizar la sujeción del accesorio colocado en el adaptador. El orificio donde se encuentra dicho tornillo se puede apreciar en la figura 36.

Para asegurar el accesorio, será necesario manipular el tornillo con una de las llaves Allen que se disponen, tal como se aprecia en la figura 37.



*Figura 37 – Instalación del rodillo central para el ensayo a flexión a 3 puntos en la célula de carga de 5 kN*

Finalizada la instalación de los accesorios, se procede con el inicio de los ensayos previstos de manera homogénea a la célula de carga de 50 kN.

## 5. Cálculos de ensayos a flexión

### 5.1 Cálculo de resistencia a flexión

Para realizar cálculo de los resultados de los ensayos de las probetas, se ha calculado la fuerza de rotura  $S$  empleando la ecuación recomendada por la normativa para las probetas de cerámica a flexión [1]. Aunque se emplee la ecuación de la normativa para las probetas cerámicas, en todas las demás normativas de los ensayos a flexión realizados, se describe la misma fórmula, pero con diferente nomenclatura, se ha empleado ésta para definir una nomenclatura de referencia en el documento. Siendo esa ecuación, la siguiente:

$$S = \frac{Fl_2}{B} \quad (8)$$

Donde:

$F$  es la carga de rotura, expresada en Newtons.

$l_2$  es la distancia entre los rodillos de apoyo, expresada en milímetros.

$B$  es la anchura de la probeta, expresada en milímetros.

Posteriormente se calcula la resistencia a flexión  $R$  expresada en Newtons por milímetro cuadrado con la ecuación (5) mostrada en el apartado 3.1.

Si en la ecuación anterior, se emplea la carga máxima, se halla el esfuerzo máximo a flexión o MOR de la probeta. Por tanto, tal y como se ha indicado en el apartado 2.3, se emplea la ecuación (2).

En el caso de las probetas de cerámica, debido a que poseen relieve en una de sus caras, el cálculo de resistencia solamente será un valor aproximado mediante el uso de estas ecuaciones.

Para realizar el cálculo de la resistencia a flexión tanto la normativa para ensayos a flexión de piedra natural [2] como para ensayos con plástico [3], recomiendan emplear las mismas ecuaciones, pero con distinta nomenclatura. En este documento se empleará la nomenclatura de la normativa de cerámica ya descrita para así evitar confusiones y lograr una mayor claridad en el documento.

Al calcular la deformación máxima, se ha empleado la ecuación (3) representada en el apartado 2.3:

Que emplea como valor el desplazamiento máximo que se mide con el bastidor de la máquina de ensayos.

Por último, para calcular el módulo de elasticidad con la ecuación descrita en el apartado 2.3, será necesario calcular la pendiente de la zona elástica del material. Para ello, salvo en el caso de las probetas de PLA, la normativa no señala ningún procedimiento ni para el cálculo de la pendiente ni del módulo en sí, ya que, para los informes de ensayo de piedra natural y cerámica, la normativa no considera este parámetro. En cambio, la norma para probetas de PLA [3] sí que recomienda un método para el módulo elástico.

Este método consiste en hallar dos puntos de la curva que se encuentren en una deformación igual a 0,05 % y 0,25 % respectivamente. Una vez hallada la tensión a la cuál pertenecen estos puntos, será posible hallar el módulo mediante la aplicación de la ley de Hooke (Figura 38).

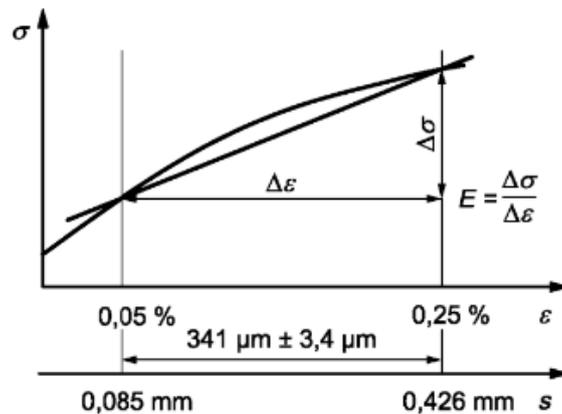


Figura 38 – Método para determinar el módulo elástico según la recomendación de la normativa [3]

Por el contrario, en este documento no se ha realizado el método recomendado por la norma, en cambio se ha calculado una línea de tendencia entre los puntos de deformación indicados por la normativa (0,05 % y 0,25 %) en la curva de tensión/deformación para así obtener la pendiente de la zona elástica y empleando la ecuación para módulo de elasticidad ya mencionada en el apartado 2.3. Este método es más riguroso que simplemente emplear 2 únicos puntos para el cálculo del módulo de

elasticidad y además permite observar el coeficiente de correlación de la línea de tendencia que es un valor bastante relevante a la hora de comparar los valores entre las diferentes probetas.

En el caso de las probetas de piedra natural y de cerámica, se ha empleado un método similar, pero en lugar de realizar la línea de tendencia entre los valores de deformación de 0,05 % y 0,25 % se utilizaron otros puntos de la curva. Este método se explica en más detalle a la hora de presentar los resultados obtenidos.

## 5.2 Cálculos estadísticos

En los cálculos estadísticos se hallan los valores de las desviaciones estándar para su posterior comparación. Es recomendado por las normativas para distinguir aquellas probetas con unos valores que difieran bastante de los valores normales de la muestra. Se emplea la expresión siguiente para las desviaciones estándar:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (6)$$

Donde:

S es la desviación estándar estadística.

$x_i$  es el valor de la carga de rotura de cada probeta.

$\bar{x}$  es el valor promedio de la carga de rotura del muestreo.

n es el número de probetas ensayadas.

### 5.3 Resultados de ensayos con baldosas cerámicas

En este apartado se exponen los resultados obtenidos de las probetas de cerámica. En primer lugar, se presentan los resultados calculados con los datos de la célula de carga de 50 kN:

Probeta	Carga máxima (F <sub>máx</sub> ) [Newtons]	MOR [MPa]	Deformación máxima ( $\epsilon_f$ ) [%]	Módulo de Elasticidad a flexión (E <sub>f</sub> ) [MPa]
C50-Cer1	398,44	18,27	0,12	15390,56
C50-Cer2	476,56	21,14	0,10	18544,48
C50-Cer3	468,75	20,88	0,12	17969,80
C50-Cer4	448,44	20,49	0,12	16627,71
C50-Cer5	518,75	23,43	0,13	17484,59
C50-Cer6	456,25	20,51	0,12	17145,26
C50-Cer7	490,63	21,54	0,13	17786,58
C50-Cer8	509,38	23,03	0,12	18316,54
Media	470,90	21,16	0,12	17408,19

Tabla 1 – Resultados de probetas de cerámica de la célula de alta carga

Como se puede observar, son resultados bastante homogéneos entre ellos tal como indica también la desviación estándar con respecto al MOR obtenido, de unos 1,6 MPa.

Seguidamente, se muestran los resultados obtenidos con la célula de carga de 5 kN:

Probeta	Carga máxima (F <sub>max</sub> ) [Newtons]	MOR [MPa]	Deformación máxima ( $\epsilon_f$ ) [%]	Módulo de Elasticidad a flexión (E <sub>f</sub> ) [MPa]
C5-Cer1	-	-	-	-
C5-Cer2	374,22	16,82	0,16	12214,55
C5-Cer3	363,91	16,22	0,14	14720,63
C5-Cer4	361,88	15,23	0,14	13649,50
C5-Cer5	402,81	17,50	0,14	13469,99
C5-Cer6	437,66	19,29	0,15	15092,60
C5-Cer7	352,97	14,93	0,14	13937,99
C5-Cer8	369,53	16,38	0,16	13997,86
Media	380,42	16,62	0,15	13869,02

Tabla 2 – Resultados de probetas de cerámica de la célula de baja carga

La primera probeta de esta tanda ha tenido que ser descartada debido a que los accesorios para la flexión a tres puntos se acaban de instalar y no se realizó un ensayo de prueba previo. Por este motivo, los rodillos de apoyo, que habían sido manipulados

durante la instalación, no se encontraban del todo acomodados al puente de carga, lo que derivó en el movimiento de éstos durante la aplicación de la carga de la primera probeta y la medición de ella se vio afectada.

La desviación estándar del MOR ha sido de 1,5 MPa, también bastante baja, ya que los datos son bastante semejantes entre ellos también. Existe una diferencia bastante importante entre los datos de las diferentes células de carga. Como los resultados de los demás materiales que se detallarán posteriormente, sí que coinciden de forma mucho más homogénea entre células de carga, es posible descartar un error de medida de la célula de baja carga, ya que para este proyecto se ha tomado de referencia la célula de alta carga y se consideran sus medidas como correctas. Por tanto, una de la hipótesis más plausible es que ambas tandas de probetas son cortes de baldosas diferentes que se han fabricado en momentos distintos. Eso explicaría el por qué la desviación estándar del MOR entre las probetas ensayadas en la misma célula de carga es muy pequeña pero el promedio del MOR es muy diferente entre los datos de la célula baja carga y entre los de la célula de baja carga.

Podemos realizar ahora una comparación de las curvas obtenidas en el ensayo entre dos de las probetas, una de cada una de las células de carga. Estas curvas tendrán una forma muy rectilínea ya que las baldosas cerámicas son materiales frágiles.

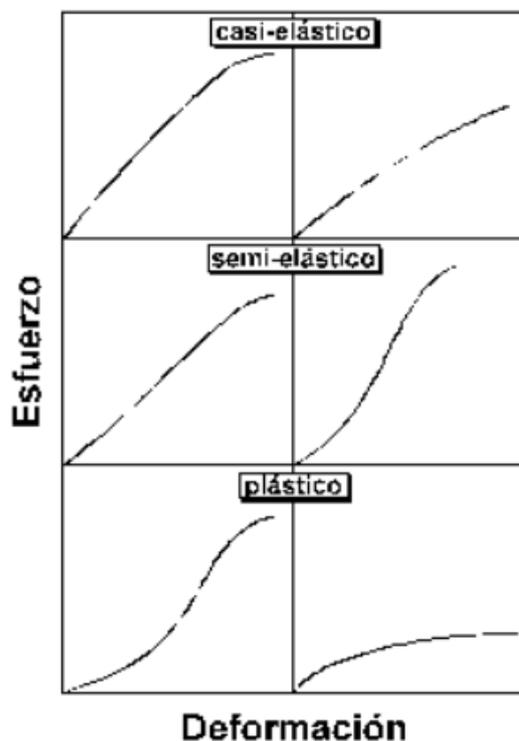


Figura 39 – Curvas de Esfuerzo/Deformación para materiales casi-elásticos, semi-elásticos y plásticos [9]

Como se observa en la figura 39, los materiales rígidos casi-elásticos, pueden presentar esa curva bastante rectilínea, debido a la ausencia de una gran zona plástica en las probetas cerámicas, se comportarán siguiendo la ley de Hooke, que establece la existencia de una proporcionalidad directa entre el esfuerzo y la deformación.

Debido a la naturaleza de este material, según lo establecido por Antonio García Casco [9], en caso de quererse, sería posible aproximar los puntos característicos de estas curvas (límite elástico, límite de proporcionalidad y punto de ruptura) ya que se encontrarían casi en el mismo lugar.

Primero se muestra la curva de las probetas cerámicas de alta carga:

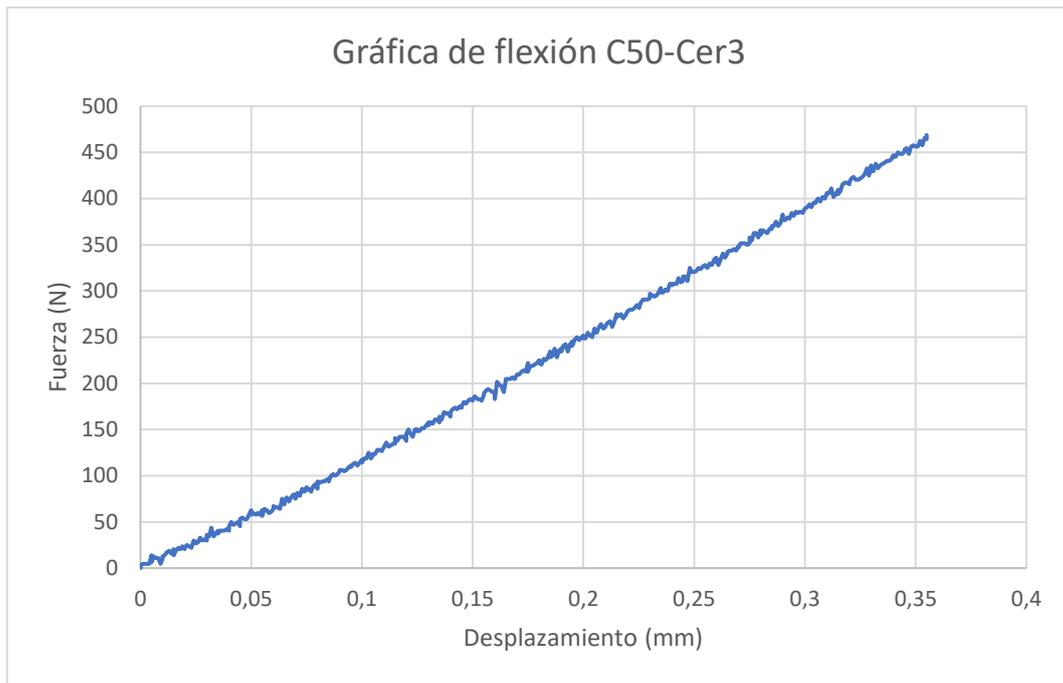


Figura 40 – Gráfica de Carga/Desplazamiento de célula de alta carga para los ensayos de flexión de probeta cerámica

Seguidamente se muestra la curva de una de las probetas de la célula de baja carga:

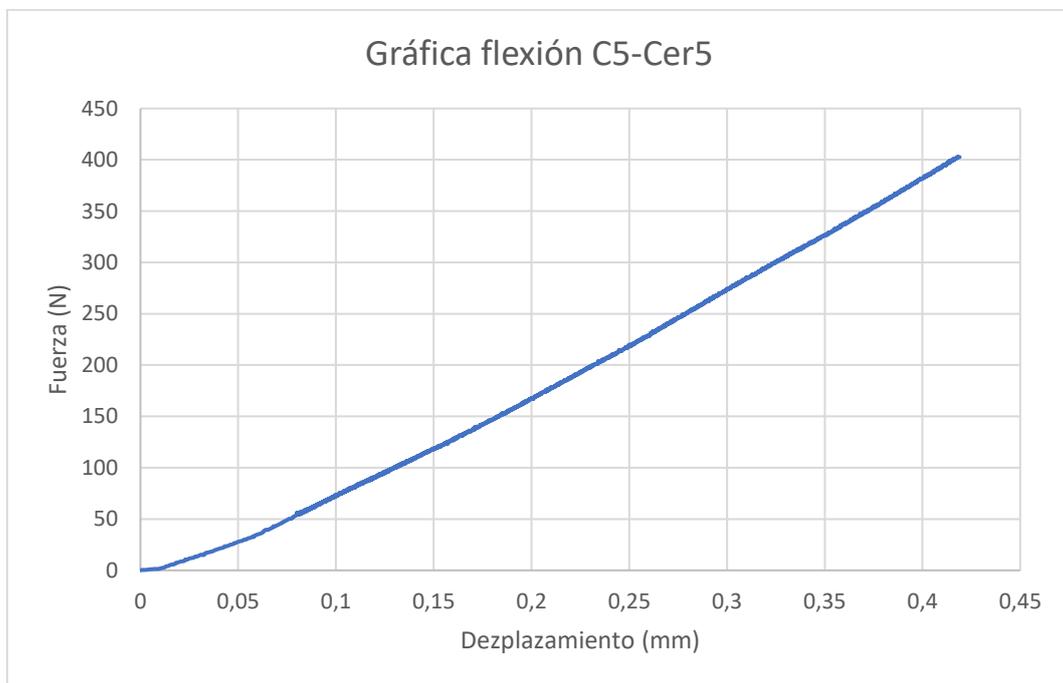


Figura 41 - Gráfica de Carga/Desplazamiento de célula de baja carga para los ensayos de flexión de probeta cerámica

A primera vista se puede distinguir que ambas tienen la misma forma rectilínea de la que se ha hablado y que, además, los valores de la célula alta presentan una distorsión

bastante considerable. Esto tiene sentido ya que la carga empleada en los ensayos con estas probetas es bastante inferior a la carga máxima para la que está diseñada la célula de alta carga, que es de uso 50 kN. Esto es bastante relevante a la hora de buscar valores específicos de pequeñas cargas ya que si son medidos por la célula de 50 kN tenderán a ser aproximaciones del valor real, mientras que, si el mismo punto es medido por la otra célula, el valor será mucho más cercano al valor real.

Para hallar el módulo elástico a flexión, como se ha mencionado, se ha calculado mediante la pendiente de la zona elástica de la curva. En el caso de las probetas cerámicas se ha empleado una sección de la curva comprendida entre 150 y 250 N donde se ha realizado una línea de tendencia y se ha tomado como pendiente de la curva, la pendiente de esta línea, a continuación, se muestran estas secciones de la curva para las dos probetas comparadas:

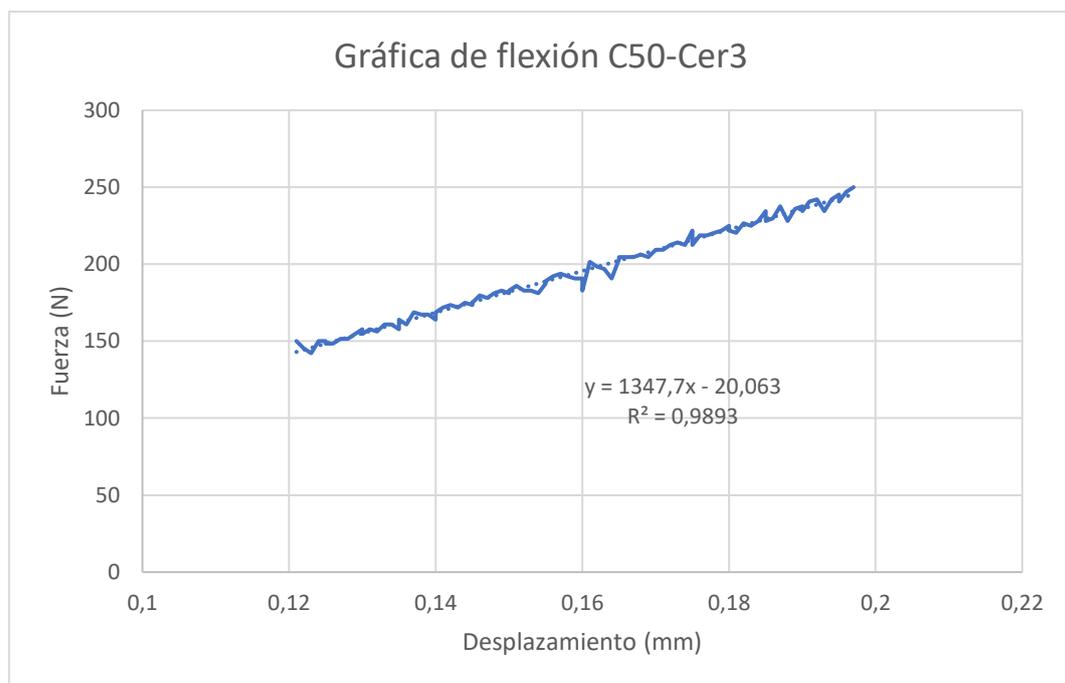
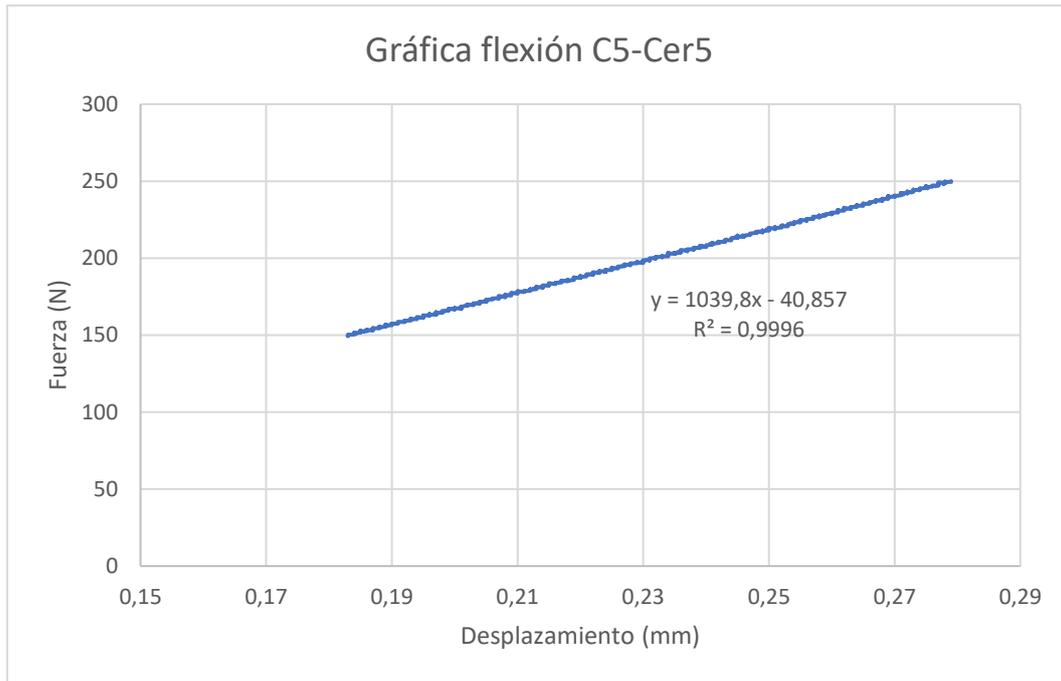


Figura 42 – Secciones de las curvas Fuerza/Desplazamiento para el cálculo de la pendiente de la zona elástica de célula de alta carga en cerámica



*Figura 43 – Secciones de las curvas Fuerza/Desplazamiento para el cálculo de la pendiente de la zona elástica de célula de baja carga en cerámica*

En la figura 42 se puede apreciar muy bien la distorsión mencionada mientras que la figura 43 carece casi de ella, además, si comparamos los valores del coeficiente de correlación de ambas líneas de tendencia, a pesar de que ambas curvas son casi rectilíneas, esta distorsión causa que exista un menor coeficiente de correlación que en las líneas de las probetas ensayadas con la célula de 5 kN. Por lo que los valores de la correlación de las líneas de tendencias de la célula de baja carga son del casi del 100 % mientras que las de alta carga son ligeramente inferiores.

Por último, destacar que el valor del módulo de elasticidad a flexión, debido a que se ha empleado el desplazamiento del bastidor para su cálculo, será una aproximación al valor real del material, tanto para estas probetas de cerámica como para los demás materiales de este estudio.

A continuación, se muestran las gráficas comparativas del conjunto de probetas ensayadas en alta y baja carga:

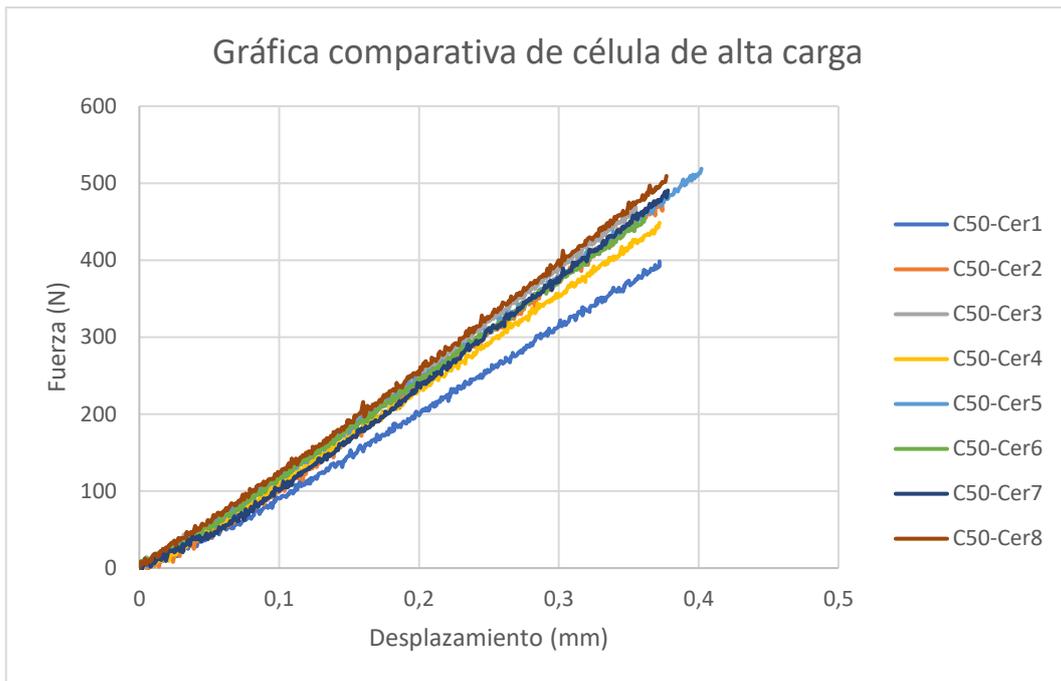


Figura 44 – Comparación de las curvas de las probetas cerámica ensayadas con la célula de alta carga

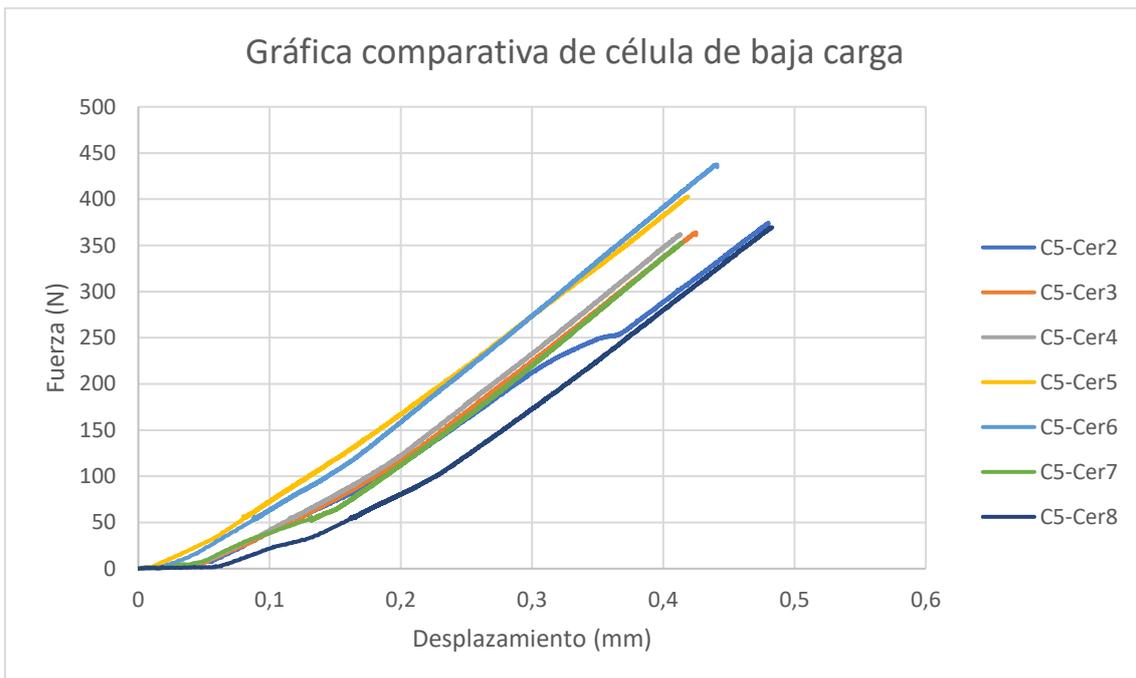


Figura 45 – Comparación de las curvas de las probetas de cerámica ensayadas con la célula de baja carga

En la comparativa de las gráficas de las probetas de alta carga, se observan curvas muy similares mientras que en las medidas con la célula de baja carga muestra curvas algo más dispersas ya que el valor del desplazamiento ha sido más afectado por el acomodamiento de la carga, lo que afecta a la diferencia entre los valores de deformación máxima que se observan entre las tablas 1 y 2. Además, la probeta C5-

Cer2, como se aprecia en la figura 45, a mitad del ensayo el punzón resbaló afectando al valor del desplazamiento pero igualmente se han obtenido resultados concluyentes de la probeta.

	Carga máxima (Fmax) [Newtons]	MOR [MPa]	Deformación máxima ( $\epsilon_f$ ) [%]	Módulo de Elasticidad a flexión (Ef) [MPa]
Célula de alta carga	470,9	21,16	0,12	17408,19
Célula de alta carga	380,42	16,62	0,15	13869,02

Tabla 3 – Comparativa de los resultados promedios entre células de carga de probetas de cerámica

Como se ha comentado con anterioridad, los valores del MOR de las probetas de una misma célula de carga coinciden entre ellas mientras que son diferentes entre células de carga diferentes, como se observa en la tabla 3. Esta diferencia del valor del MOR es debido a la diferencia de medidas en la carga máxima ya que se emplea para el cálculo del MOR.

Como se ha podido observar, los valores de la deformación máxima entre ambas células, son bastante similares y de un valor muy pequeño, característico de materiales con gran rigidez.

Respecto al valor promedio del módulo elástico, es diferente en ambas células de carga, principalmente debido a la diferencia entre los valores de carga máxima que se han comentado.

#### 5.4 Resultados de ensayos con piedra natural

De la misma manera, se presentan los resultados de los ensayos de piedra natural con la célula de alta carga primero:

	Carga máxima (Fmax) [N]	MOR [MPa]	Deformación máxima ( $\epsilon$ ) [%]	Módulo de Elasticidad a flexión (Ef) [MPa]
C50-P1	-	-	-	-
C50-P2	-	-	-	-
C50-P3	1585,94	22,29	0,39	11267,89
C50-P4	1675,00	20,19	0,41	9115,65
C50-P5	2507,81	31,51	0,37	11812,49
C50-P6	1473,44	18,30	0,39	10177,51
C50-P7	1957,81	29,42	0,31	14336,51
C50-P8	2434,38	32,11	0,36	13186,70
C50-P9	1751,56	24,54	0,31	14207,65
C50-P10	1217,19	16,03	0,27	8382,30
C50-P11	1839,06	26,56	0,33	14415,00
C50-P12	2376,56	32,57	0,34	12595,69
C50-P13	2100,00	29,30	0,31	13681,44
Media	1901,70	25,71	0,35	12107,17

*Tabla 4 – Resultados de probetas de piedra natural de la célula de alta carga*

Se han descartado dos de los valores obtenidos de las dos primeras probetas. La primera de ellas presentó valores con bastante dispersión mientras que la segunda de ellas rompió antes de realizar el ensayo por lo que los valores de éstas se han considerados no concluyentes y se han descartado para el estudio.

La desviación estándar que presentan los datos con respecto al MOR es de unos 5,8 MPa, bastante superior a la obtenida en las probetas de cerámica, pero esto era de esperar debido a la naturaleza heterogénea que presentan las probetas de piedra natural que de forma irremediable aumenta esta dispersión en los datos de las medidas.

De la misma manera, se exponen los resultados de la célula de baja carga:

Probeta	Carga máxima (Fmax) [N]	MOR [MPa]	Deformación máxima ( $\epsilon$ ) [%]	Módulo de Elasticidad a flexión (Ef) [MPa]
C5-P1	2251,09	29,56	0,52	8192,01
C5-P2	1873,59	23,65	0,62	7724,21
C5-P3	1946,41	21,32	0,66	6750,24
C5-P4	1795,47	21,11	0,57	7076,81
C5-P5	2026,72	27,64	0,54	10232,73
C5-P6	1660,94	24,34	0,48	10736,80
C5-P7	1877,81	21,74	0,40	7375,78
C5-P8	1879,84	25,21	0,63	8913,97
C5-P9	2572,19	28,83	0,67	8034,72
C5-P10	1655,31	20,89	0,70	8117,04
C5-P11	1929,06	22,79	0,56	7096,67
C5-P12	1829,84	26,45	0,54	11100,44
C5-P13	1584,69	23,66	0,40	10489,18
Media	1914,07	24,40	0,56	8603,12

Tabla 5 – Resultados de probetas de piedra natural de la célula de baja carga

En este caso, la desviación estándar es de 3,0 MPa, bastante inferior a las medidas con la célula de alta carga, pero, debido a lo comentado de la piedra natural, no es posible afirmar que la reducción de la desviación se deba al uso de la célula de 5 kN ya que lo más probable es que simplemente las probetas escogidas han sido más homogéneas entre ellas.

Por otro lado, los valores de carga máxima y los de MOR, son bastante similares entre los datos obtenidos de ambas células de carga. En cambio, los valores de la deformación máxima son diferentes. Esta diferencia de la deformación se debe a que el desplazamiento total en el ensayo de las piedras naturales es un valor bastante pequeño, de menos de 0,3 mm y éste se ha calculado con el desplazamiento del bastidor, que irremediamente en la longitud del desplazamiento también se encuentran valores de acomodación de la carga, por lo que es imposible hallar el valor de desplazamiento real.

A pesar de que la forma de la curva esperada debería ser igual a la de los materiales cerámicos, este error en el desplazamiento por la acomodación de la carga se puede observar en las gráficas de las probetas de piedra natural:

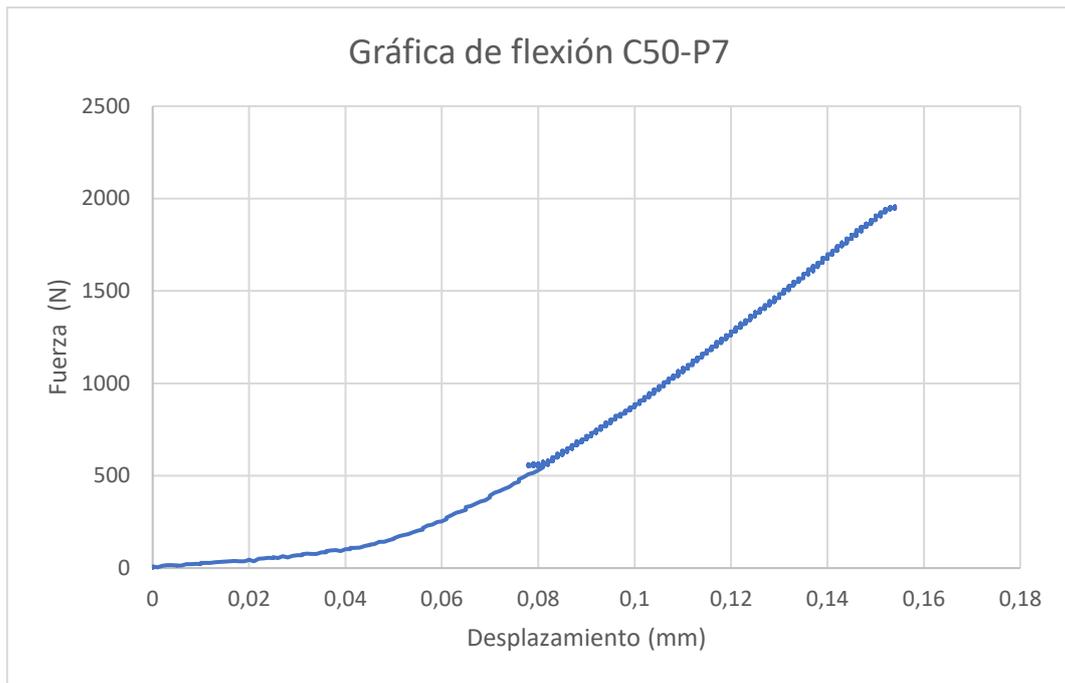


Figura 46 – Gráfica de Carga/Desplazamiento de célula de alta carga para los ensayos de flexión de probeta de piedra natural

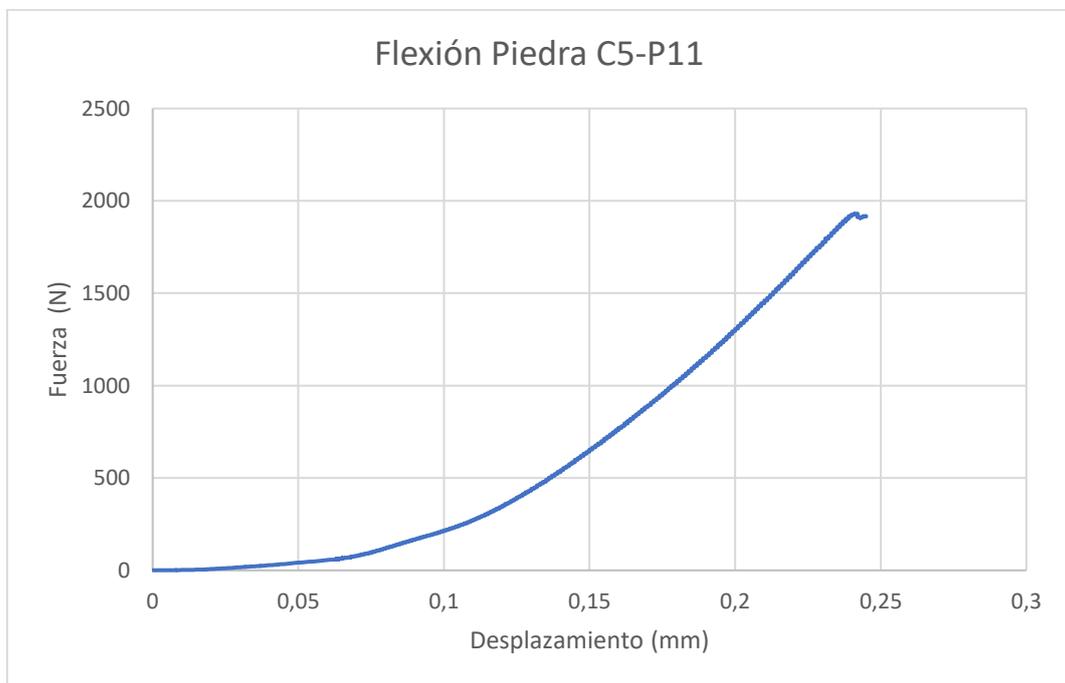


Figura 47 – Gráfica de Carga/Desplazamiento de célula de baja carga para los ensayos de flexión de probeta de piedra natural

Como se ha mencionado, la curva real debe ser casi en su totalidad, rectilínea, como sucede con las probetas cerámicas por lo que la primera sección de la curva, corresponde a la acomodación de la carga mientras que después de esta, se aprecia la característica sección rectilínea de la zona elástica.

También es destacable la poca distorsión que la curva de la gráfica de la célula de alta carga comparada con la homóloga de las probetas de cerámica. Esto es debido a que la carga empleada para las piedras naturales es mayor que la empleada en las probetas cerámicas.

Respecto a las secciones de la curva empleadas para el cálculo de la pendiente de la zona elástica, en el caso de las probetas de piedra natural, se han seleccionado los valores comprendidos entre 1000 y 1200 N:

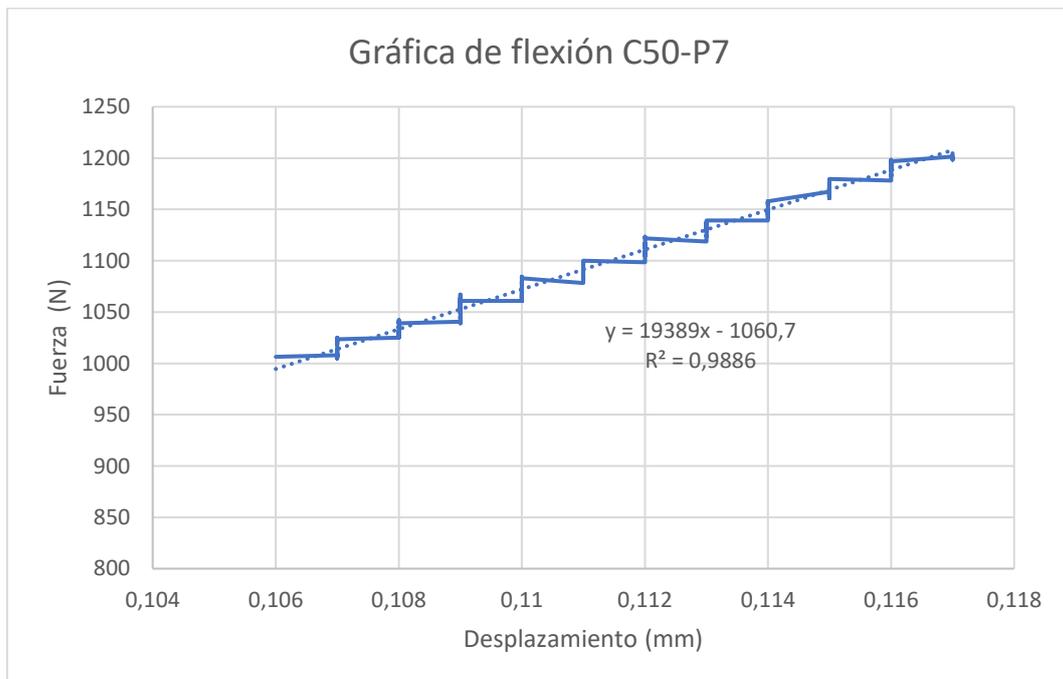


Figura 48 – Secciones de las curvas Fuerza/Desplazamiento para el cálculo de la pendiente de la zona elástica de célula de alta carga en piedra natural

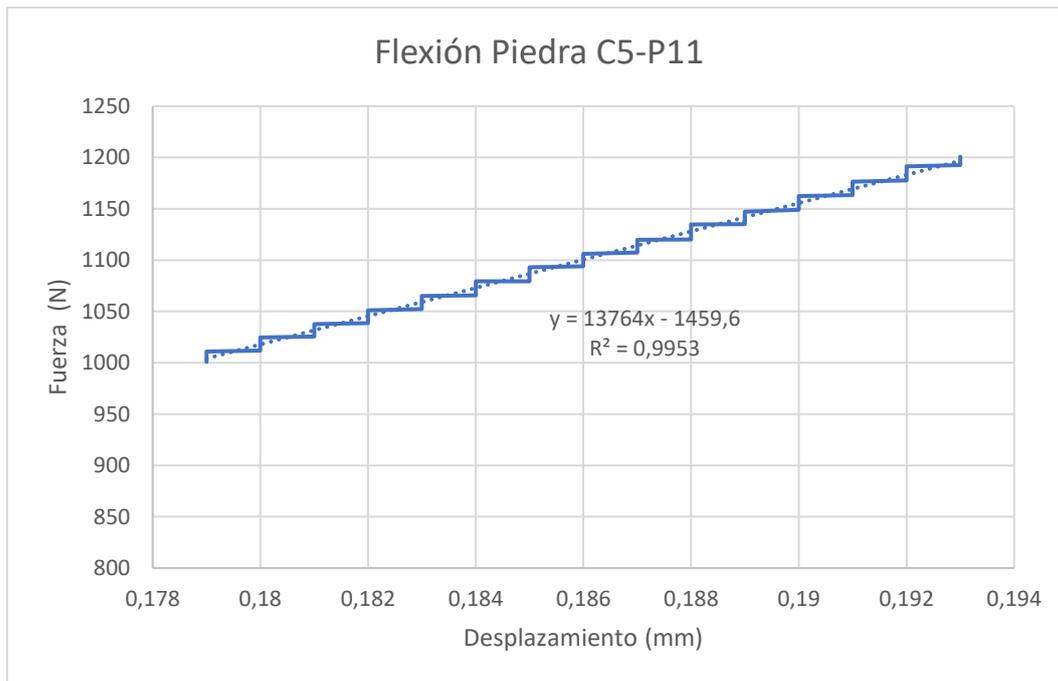


Figura 49 – Secciones de las curvas Fuerza/Desplazamiento para el cálculo de la pendiente de la zona elástica de célula de baja carga en piedra natural

En este caso, las distorsiones apenas son apreciables también en las secciones y por ese motivo, la línea de tendencia tiene un coeficiente de correlación casi del 100 % para ambas células, por lo que se observa que a esfuerzos superiores del rango de 1000 N el comportamiento en las mediciones de ambas células es bastante similar.

A continuación, se muestran también las gráficas comparativas entre las probetas, pero en este caso, debido al gran número de probetas ensayadas en cada tanda, se ha limitado el número de probetas mostradas para una mejor claridad de las curvas. Se han conservado las dos probetas cuyas curvas se encuentran en el extremo inferior y superior del valor de fuerza y se han omitido varias que se encuentran entre éstas:

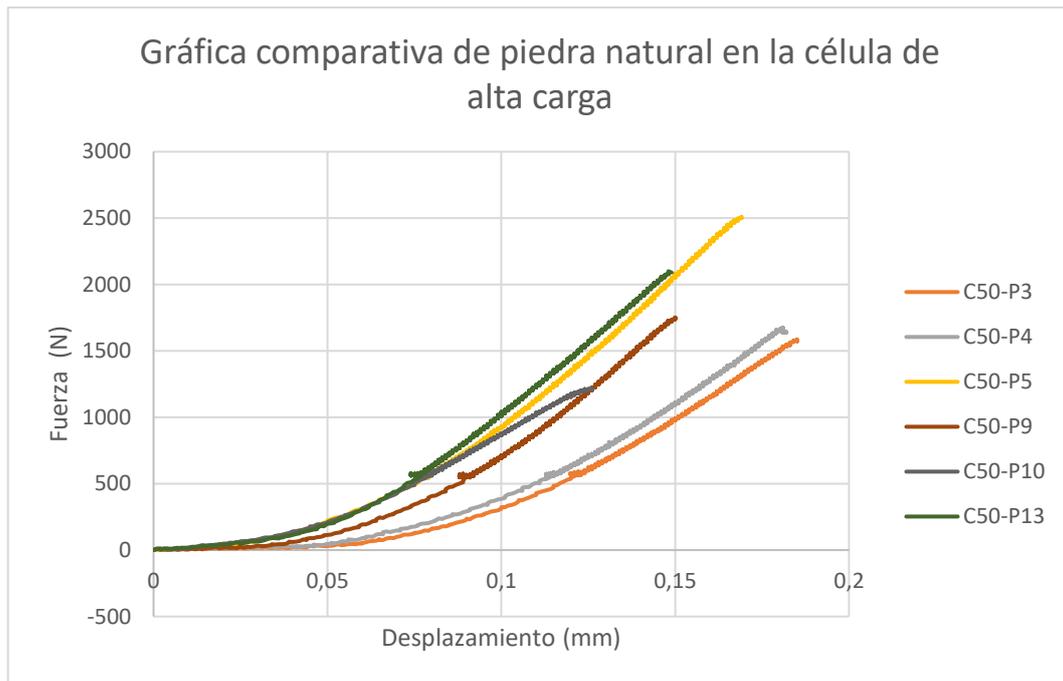


Figura 50 – Comparación de las curvas de las probetas de piedra natural ensayadas con la célula de alta carga

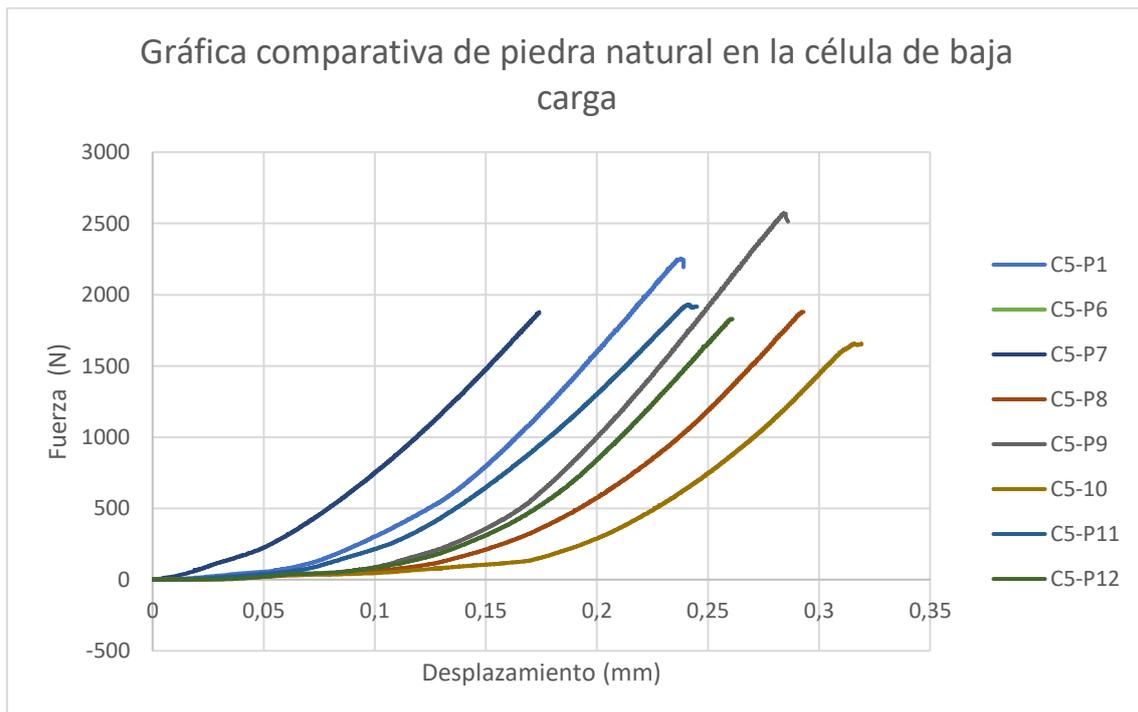


Figura 51 – Comparación de las curvas de las probetas de piedra natural ensayadas con la célula de baja carga

Al igual que en las células de cerámica, la principal diferencia se encuentra entre las curvas, es el valor del desplazamiento debido a la acomodación de la carga que se encuentra más marcado en las curvas de baja carga a consecuencia de una mayor sensibilidad en los valores medidos de carga ya que la célula mide pequeñas cargas de

entre 1 y 3 N que corresponden a que solo una parte del rodillo central entra en contacto con la probeta y después de un breve desplazamiento, toda la superficie del rodillo presiona a la probeta y esta carga se incrementa notoriamente.

	Carga máxima (Fmax) [Newtons]	MOR [MPa]	Deformación máxima ( $\epsilon_f$ ) [%]	Módulo de Elasticidad a flexión (Ef) [MPa]
Célula de alta carga	1901,70	25,71	0,35	12107,17
Célula de alta carga	1914,07	24,40	0,56	8603,12

Tabla 6 – Comparativa de los resultados promedios entre células de carga de probetas de piedra natural

En la tabla 6, se puede apreciar que el valor promedio de la carga máxima entre ambas células es bastante similar entre ellos, por lo que el MOR, que es calculado con ese valor, también es bastante similar.

En cambio, los valores de deformación máxima son diferentes debido al error producido por la acomodación de la carga ya mencionado.

### 5.5 Resultados de ensayos con PLA

Por último, se exponen los valores de los resultados con las probetas de PLA, empezando por las probetas ensayadas con la célula de alta carga:

Probeta	Carga máxima (Fmax) [Newtons]	MOR [MPa]	Deformación máxima ( $\epsilon$ ) [%]	Módulo de Elasticidad a flexión (E) [MPa]
C50-A1	159,38	86,92	5,60	1599,02
C50-A2	153,13	86,25	4,81	2207,96
C50-A3	148,44	80,79	4,09	2633,66
C50-A4	157,81	87,34	4,64	2087,59
C50-A5	159,38	89,28	4,35	2617,75
C50-A6	150,00	87,72	4,57	3097,43
Media	154,69	86,38	4,68	2373,90

Tabla 7 – Resultados de probetas de PLA de la célula de alta carga

En este caso, la desviación estándar del MOR es de unos 2,9 MPa. Se observa en la deformación que este material es bastante diferente de los otros dos estudiados, ya que

mientras que la cerámica y la piedra natural presentan poca deformación, el valor en el PLA es bastante superior.

Seguidamente, se exponen los mismos resultados, pero hallados con las probetas ensayadas con la célula de baja carga:

Probeta	Carga de máxima (F <sub>máx</sub> ) [Newtons]	MOR [MPa]	Deformación máxima ( $\epsilon$ ) [%]	Módulo de Elasticidad a flexión (E) [MPa]
C5-A1	145,78	82,50	4,49	2466,08
C5-A2	146,88	78,64	4,57	2282,14
C5-A3	148,28	76,14	4,43	2202,23
C5-A4	143,44	77,46	4,24	2308,21
C5-A5	147,19	81,59	4,75	2386,24
C5-A6	140,47	80,05	4,55	2453,70
MEDIA	145,34	79,40	4,51	2349,77

*Tabla 8 – Resultados de probetas de PLA de la célula de baja carga*

En este caso, los valores numéricos son bastante próximos a los observados en la célula de alta carga, además, la desviación estándar es 2,4 MPa en este caso.

Cabe señalar que el valor del módulo de elasticidad a flexión de ambas tandas de ensayo. Son bastante equivalentes a los que obtuvieron en sus ensayos Alejandro del Médico [10] y Eduardo Cabello [11].

Se presenta ahora la curva de carga de una de las probetas para cada una de las células de carga:

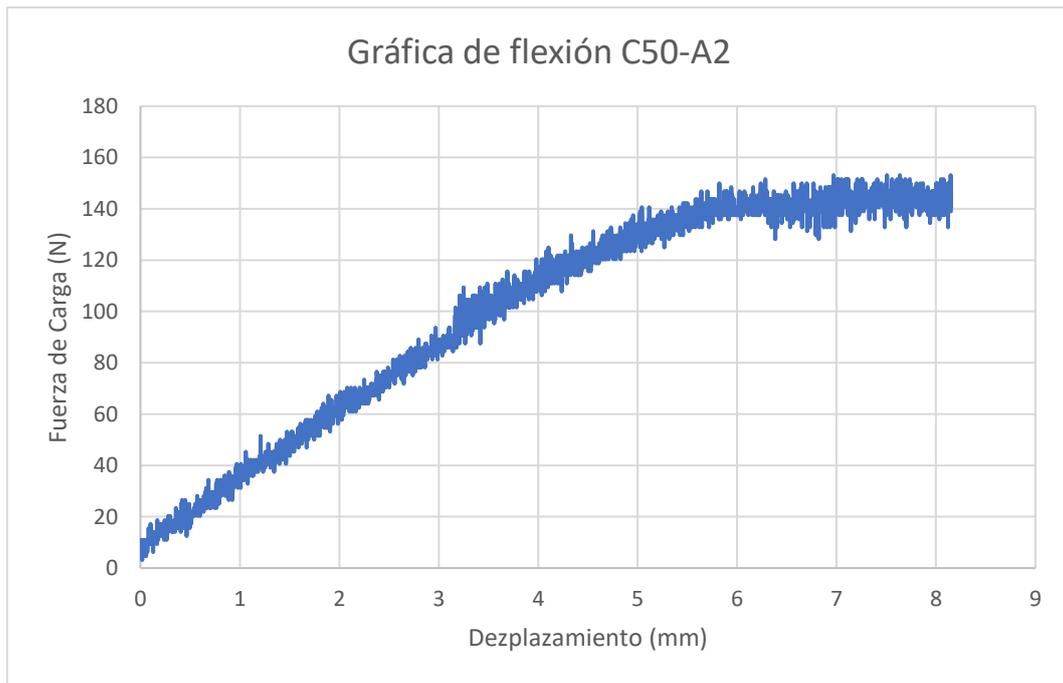


Figura 52 – Gráfica de Carga/Desplazamiento de célula de alta carga para los ensayos de flexión de probeta de PLA

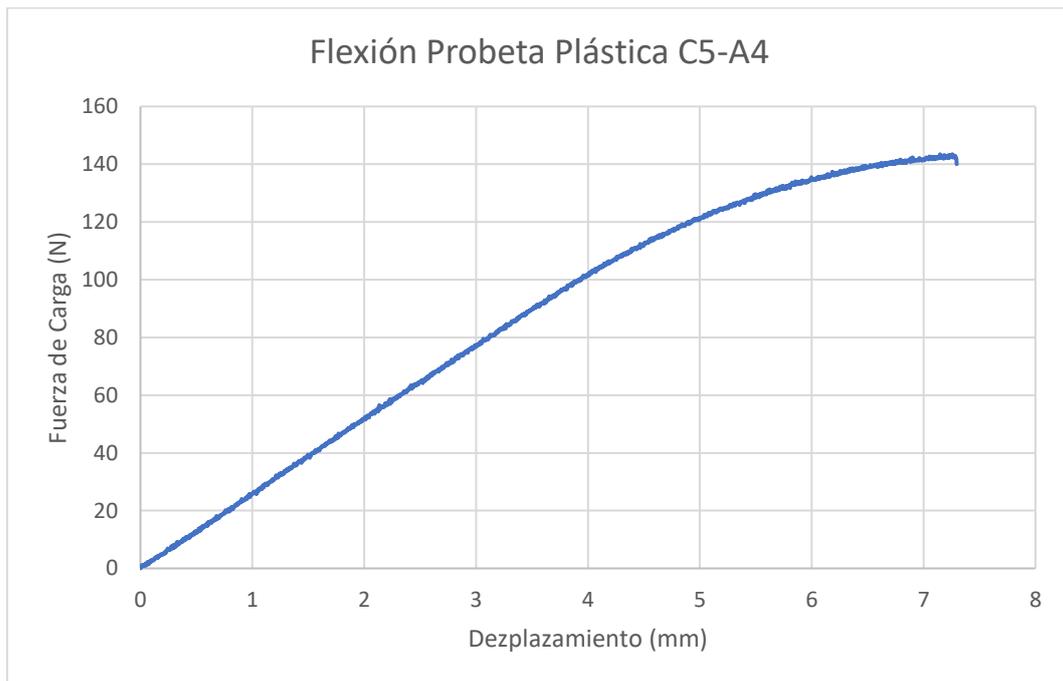


Figura 53 – Gráfica de Carga/Desplazamiento de célula de baja carga para los ensayos de flexión de probeta de PLA

A pesar de que son curvas bastante similares, lo primero que llama la atención es la distorsión de la figura 52, mientras que en la figura 53 no es apreciable ninguna. Como se ha visto en la presentación de los resultados, los todos los valores finales expuestos en las tablas 4 y 5, son bastante equivalentes entre ellos a pesar de esta distorsión por lo

que en lo que respecta a la toma de datos general, ambas células serían aptas para la labor. Aunque se debe tener en cuenta que la célula de alta carga presentará un error bastante mayor a la hora de estudiar puntos específicos de la curva, como podría ser el punto de ruptura o el valor de carga máxima de la curva, por lo que estos puntos se alejan más de su valor real al medirlos con la célula de alta carga y serán más próximos al medirlos con la de baja carga.

Como se ha comentado con anterioridad, para el cálculo del módulo de elasticidad a flexión, se ha cortado una sección de la curva de fuerza/desplazamiento correspondiente a una deformación comprendida entre los valores de 0,05 y 025 %, que son los valores que recomienda la normativa para flexión de plásticos [3]. Aunque en lugar de calcular el módulo como la recomendación, se ha hallado por el mismo procedimiento que en la piedra natural y las vadosas cerámicas.

Siendo estas secciones las obtenidas:

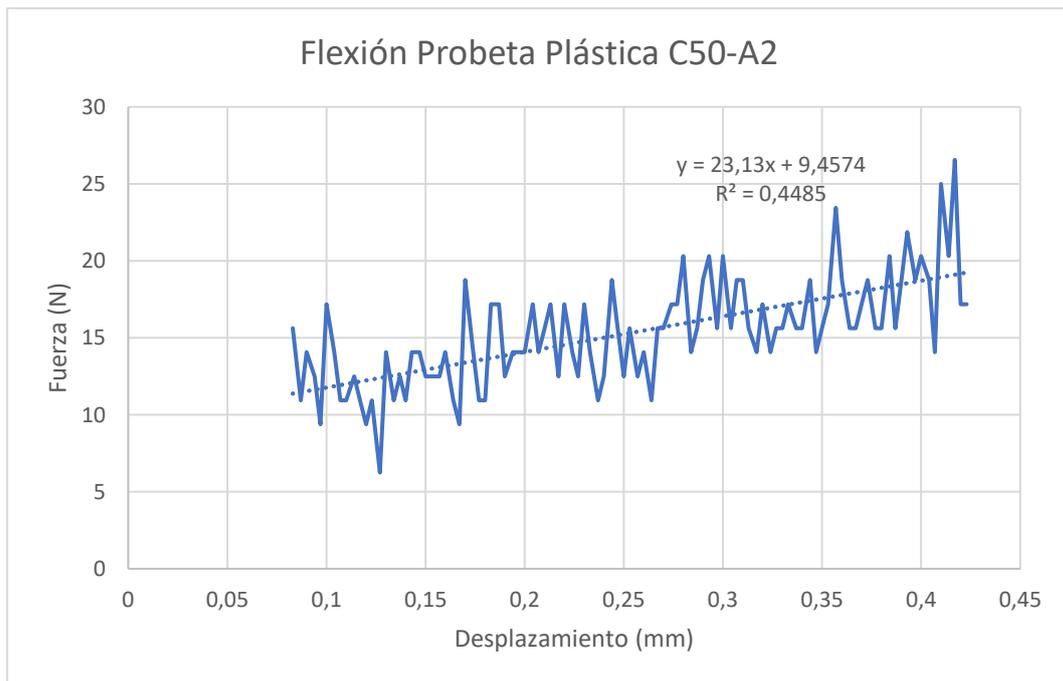
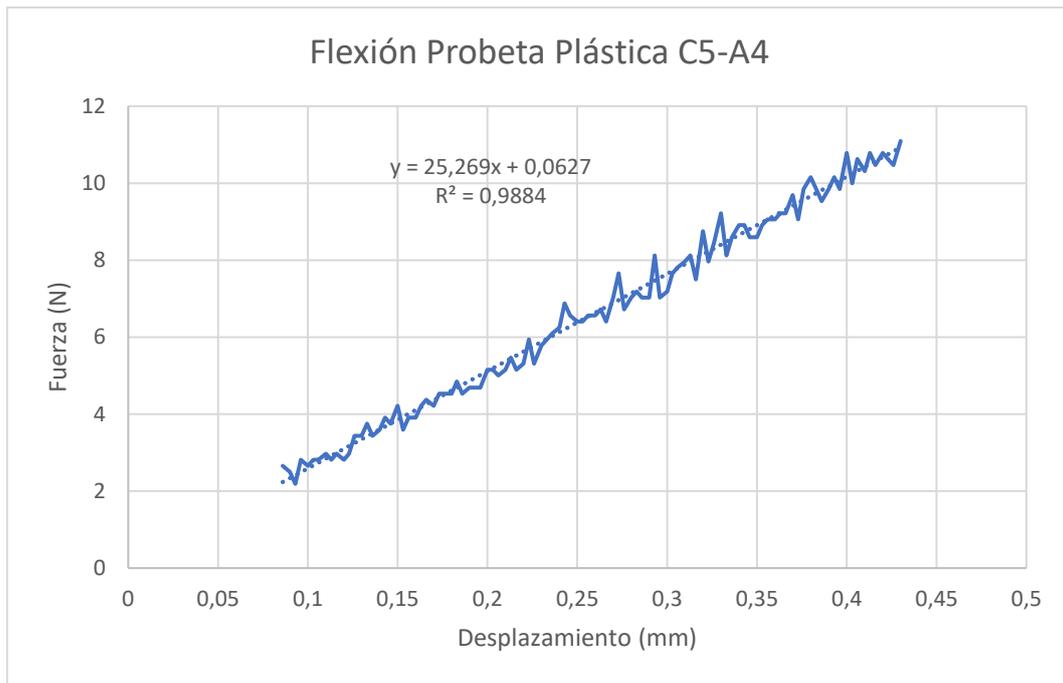


Figura 54 – Secciones de las curvas Fuerza/Desplazamiento para el cálculo de la pendiente de la zona elástica de célula de alta carga en PLA



*Figura 55 – Secciones de las curvas Fuerza/Desplazamiento para el cálculo de la pendiente de la zona elástica de célula de baja carga en PLA*

De la misma manera, destaca la diferencia en distorsión entre ambas secciones, lo que devuelve una pendiente con un coeficiente de correlación del 99 % en la célula de baja carga y de un 45 % en la de alta carga, lo que es una diferencia bastante importante.

Las gráficas comparativas de las figuras 56 y 57, se diferencian mucho de las anteriores de los otros materiales (Figuras 44, 45, 50 y 51), ya que las curvas de las probetas en ambas células de carga son casi idénticas entre ellas. Es interesante observar como el error en el desplazamiento por la acomodación de la carga apenas es apreciable en este material ya que el PLA es un material menos rígido, siendo el porcentaje de error mucho menor.

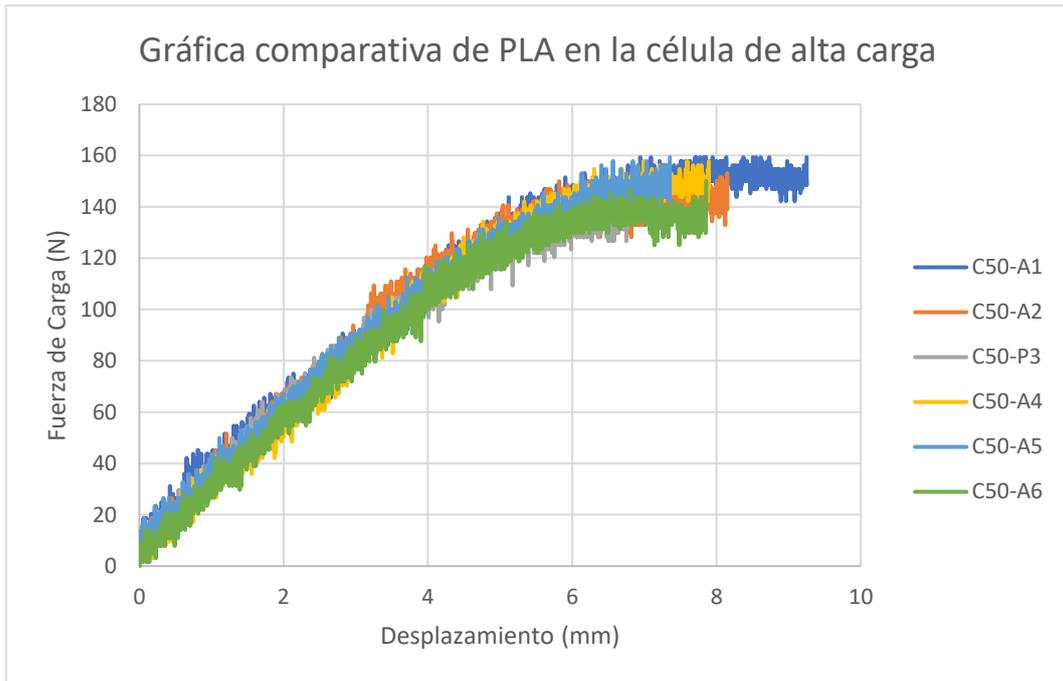


Figura 56 – Comparación de las curvas de las probetas de PLA ensayadas con la célula de alta carga

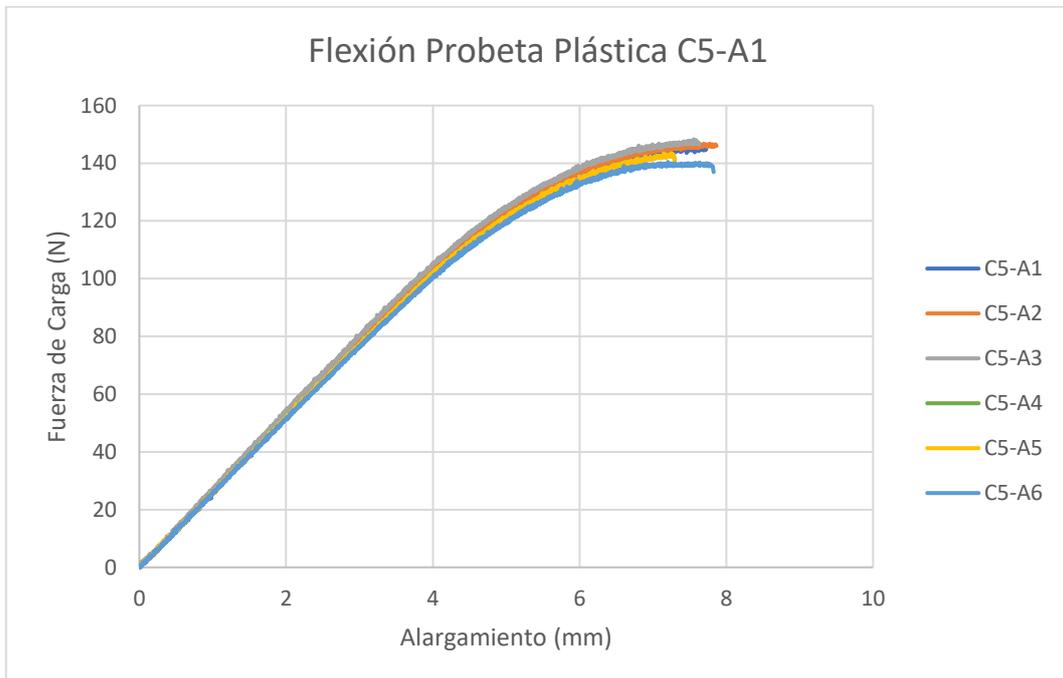


Figura 57 – Comparación de las curvas de las probetas de PLA ensayadas con la célula de baja carga

	Carga máxima (Fmax) [Newtons]	MOR [MPa]	Deformación máxima ( $\epsilon_f$ ) [%]	Módulo de Elasticidad a flexión (Ef) [MPa]
Célula de alta carga	154,69	86,38	4,68	2373,9
Célula de baja carga	145,34	79,4	4,51	2349,77

Tabla 9 – Comparativa de los resultados promedios entre células de carga de probetas de piedra natural

En la tabla 9, se aprecian que los valores promedios de todos los valores son coincidentes para cada una de las células de carga tal como se ha ido comentando en este apartado.

### 5.6 Resumen de comparación de los resultados entre los diferentes materiales

La finalidad del estudio es comprobar si las medidas de ambas células son similares y puesto que el parámetro que miden las células es la fuerza de carga, por ello, es una buena comparación observar los resultados del MOR entre las células de carga ya que toma en cuenta el valor de la fuerza y las dimensiones de las probetas. Se expone así una tabla comparativa del MOR para cada uno de los materiales:

	Probetas de cerámica	Probetas de piedra Natural	Probetas de PLA
MOR (MPa) con célula de alta carga	21,16	25,71	86,38
MOR (MPa) con célula de baja carga	16,62	24,40	79,40

Tabla 10 – Resultados promedios de los valores del MOR de ambas células de carga

En la tabla se puede apreciar con mejor claridad los resultados del MOR que son valores bastante cercanos entre sí, siendo el más diferente en las probetas de PLA, con 6,98 MPa de diferencia. Mientras que las probetas de piedra natural tienen el MOR más próximo entre las células de carga, con 1,31 MPa. Por último, las probetas de cerámica tienen una diferencia de 4,54 MPa.

En la comparación de los valores de carga máxima obtenemos la siguiente tabla:

	Probetas de cerámica	Probetas de piedra Natural	Probetas de PLA
Carga máxima [N] con célula de alta carga	470,90	1901,70	154,69
Carga máxima [N] con célula de baja carga	380,42	1914,07	145,34

*Tabla 11 – Resultados promedios de los valores de carga máxima de ambas células de carga*

Como se puede observar, la diferencia es bastante similar en todas las probetas a excepción de en las probetas de cerámica, que como se ha comentado en el apartado 5.3, es posible que las probetas ensayadas tuvieran una estructura diferente al ser cortes de diferentes baldosas fabricadas en distintas tandas, siendo esta diferencia de 90,48 N. En cambio, los valores promedios de la piedra natural, tienen una diferencia de tan solo 12,37 N, un valor bastante pequeño si tenemos en cuenta la estructura heterogénea del material. Mientras que, en los valores de las probetas de PLA, se obtuvo una diferencia de 9,35 N, algo menor que el promedio en piedra natural.

Se expone ahora la comparativa de la deformación máxima promedia entre ambas células de carga:

	Probetas de cerámica	Probetas de piedra Natural	Probetas de PLA
Deformación máxima [%] con célula de alta carga	0,12	0,35	4,68
Deformación máxima [%] con célula de baja carga	0,15	0,56	4,51

*Tabla 12 – Resultados promedios de los valores de deformación máxima de ambas células de carga*

Como se aprecia en los valores, el porcentaje de diferencia de deformación en las probetas cerámicas, es de un 0,03 %, mientras que en la piedra natural es de 0,21 %. En las probetas de PLA, se obtienen valores de deformación más elevados ya que no es un material tan rígido como los anteriores y con una diferencia entre los valores promedios entre células de tan solo 0,17 %. Estos datos de deformación, se han obtenido mediante el valor del desplazamiento del bastidor, por lo que son una aproximación al valor real por lo que se ha comentado ya de un posible error en las medidas debido al acomodamiento de la carga.

El último parámetro a comparar, es el del módulo de elasticidad a flexión, que se expone en la siguiente tabla:

	Probetas de cerámica	Probetas de piedra Natural	Probetas de PLA
Módulo de Elasticidad a flexión [MPa] con célula de alta carga	17408,19	12107,17	2373,90
Módulo de Elasticidad a flexión [MPa] con célula de baja carga	13869,02	8603,12	2349,77

*Tabla 13 – Resultados promedios de los valores del módulo de elasticidad a flexión de ambas células de carga*

En los valores promedios del módulo de las probetas cerámicas, existe una diferencia de 3539,17 MPa, mientras que en los valores de piedra natural es de 3504,05 MPa. Como se puede observar, el error entre estos dos materiales es bastante similar mientras que en las probetas de PLA es de tan solo unos 24,13 MPa.

## 6. Conclusiones

Después de la realización de los ensayos a flexión, se han extrapolado varias conclusiones sobre las células de carga:

Los valores generales obtenidos con ambas células son similares, por lo que las mediciones se pueden considerar homogéneas. Se entiende por valores generales, parámetros como el módulo de elasticidad a flexión. Esto significa que se pueden llegar a los mismos resultados finales en los ensayos con ambas células.

Aunque las curvas obtenidas con la célula de alta carga, presentan una distorsión mucho mayor que la de baja carga para valores de carga muy reducida, mientras que esta diferencia de distorsión es poco apreciable en ensayos con esfuerzos más elevados.

La existencia de una gran distorsión en las curvas la célula de alta carga para las probetas con menores cargas, significa que los valores de puntos específicos, no corresponden a los valores reales, pero el promedio con los puntos adyacentes posee un valor más cercano al real. Lo que permite que aún así se puedan llegar a valores concluyentes. Se aprecia una disminución de la distorsión en los valores de la célula de 50 kN para ensayos con cargas mayores, como se ha observado en los ensayos de piedra natural, lo que concluye que los valores medidos con ambas cargas serán más homogéneos cuanto más se incremente la carga.

En cambio, la distorsión en las curvas de baja carga es mínima y poco apreciable, lo que resulta en que cada punto medido en la curva sí que sea bastante aproximado al valor real.

Por estos motivos, queda claro que la célula de 50 kN no ha sido diseñada para la medición de valores con cargas muy bajas y para valores de carga inferiores a los empleados para las probetas de piedra natural, se recomienda usar para la medición la célula de baja carga.

## 7. Conclusions

After the realization of the bending tests, there are some conclusions obtained about the load cells:

The general values gotten with both load cells are very similar, so the measurement can be considered homogeneous. Those general values are parameters as de flexural elastic modulus. Which means that it is possible to achieve the same results with any of the load cells.

Although the curves obtained with the high load cell have a greater distortion on their values than the ones from the low load cell for low charge value. Meanwhile the distortion is reduced when the test charge is higher.

The fact that there is a big distortion in the high load cell curves for the lower charge materials, means that the specific values from the curves are more distant from the real ones but if the average value from points next to each other is calculated, it will be closer to the real value. This allows that the high load cell values can be considered conclusive. When the tests are done with a higher charge, there is a reduction on the distortion in the values from the 50 kN load cell, as it is showed in the natural stone tests, so it is concluded that the values gotten from both load cells will be more equal as the charge is increased.

Instead, the low load cell distortion is minimal and hardly appreciable, so it results in every measured point in the curve being very close to the real value.

For those reasons, it is clear that the 50 kN load cell is not designed for the measurement of low charges and for getting values lower than the ones used on the natural stone tests it is more recommended the use of the low load cell.

## **8. Futuras líneas de trabajo**

Para la ampliación del estudio realizado, se proponen diferentes líneas de trabajo:

Se pueden emplear diferentes ensayos mecánicos además del ensayo a flexión a 3 puntos, como ensayos a compresión, ya que se es posible acoplar el accesorio a compresión del laboratorio a la célula de baja carga. Para poder añadir el ensayo a tracción, sería necesario adquirir un accesorio compatible para la célula de baja carga ya que el que se dispone en el laboratorio solamente es compatible con la célula de alta carga.

También sería interesante añadir otros tipos de materiales a los ensayos cuya carga sea algo inferior a los valores de la piedra natural para comprobar a qué rango de valores de fuerza comienza a ser menos notable la dispersión en la célula de alta carga.

De la misma manera, al añadir otro tipo de material, se podría estudiar el comportamiento de la célula de baja en sus valores más próximos a su valor máximo de 5 kN para comprobar si en ese rango de valores hay alguna diferencia notable en emplear una célula u otra.

## 9. Glosario de términos

### **Ácido Poliláctico (PLA):**

Es un polímero biodegradable que ha sido fabricado con base de almidón o caña de azúcar muy empleado en moldes de inyección para producir piezas de impresión 3D.

### **Bastidor:**

Estructura que soporta diferentes elementos de la máquina de ensayos.

### **Estufa:**

Aparato de calefacción empleado en laboratorios para secar o desinfectar materiales por medio del calor.

### **Límite elástico:**

Es el valor que corresponde al punto que separa la zona elástica de la zona plástica de un material.

### **Módulo elástico:**

Es una constante elástica que caracteriza a un material y se relaciona con su rigidez

### **MOR:**

Módulo de ruptura del material, corresponde al esfuerzo máximo que soporta.

### **Software:**

Programa informático que ejecuta tareas mediante una serie de normas indicadas.

## 10. Bibliografía

### Normativas:

[1] Baldosas cerámicas. Parte 4: Determinación de la resistencia a la flexión y de la fuerza de rotura. (UNE-EN ISO 10545-4:2019)

[2] Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada. (UNE-EN 12372:2022)

[3] Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión. (UNE-EN ISO 178:2020)

### Referencias bibliográficas:

[4] Shimadzu. Acessories for AG, AGS, and EZ Series Universal. <https://www.shimadzu.com/an/products/materials-testing/uni-ttm-consumables/accessory/index.html#top>

[5] Scientia et Technica Año XIII, No 35, Agosto de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. RESULTADOS DEL ENSAYO A FLEXIÓN EN MUESTRAS DE BAMBÚ DE LA ESPECIE *Guadua angustifolia* Kunth. Página 503 – 507

[6] Tenso Unitex. Ley de elasticidad de Hooke.

<http://www.tenso.es/utilidades/glosario.asp?termino=Ley%20de%20elasticidad%20de%20Hooke>

[7] Tenso Unitex. Ensayo a tracción.

<http://www.tenso.es/utilidades/glosario.asp?termino=Ensayo%20de%20tracci%F3n>

[8] Zweben, C.; WS Smith & MW Wardle (1979), "Métodos de prueba para la resistencia a la tracción de la fibra, módulo de flexión compuesto y propiedades de laminados reforzados con tela", *Materiales compuestos: Pruebas y diseño* (Quinta conferencia), ASTM International: 228–228–35.

[9] Antonio García Casco. Universidad de Granada. Propiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación.

<https://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>

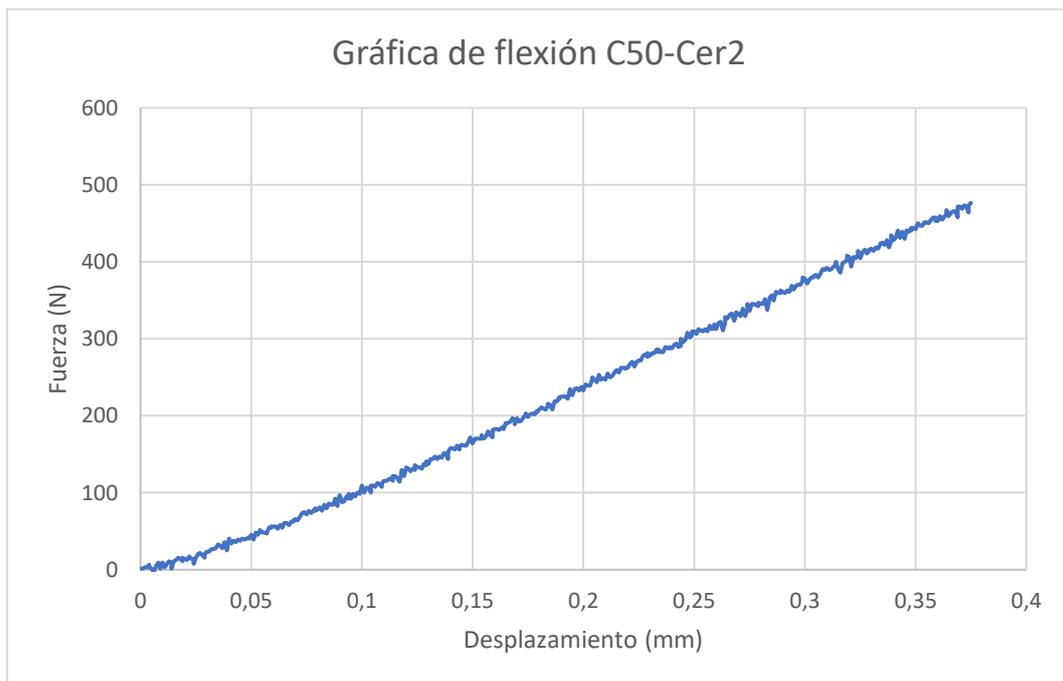
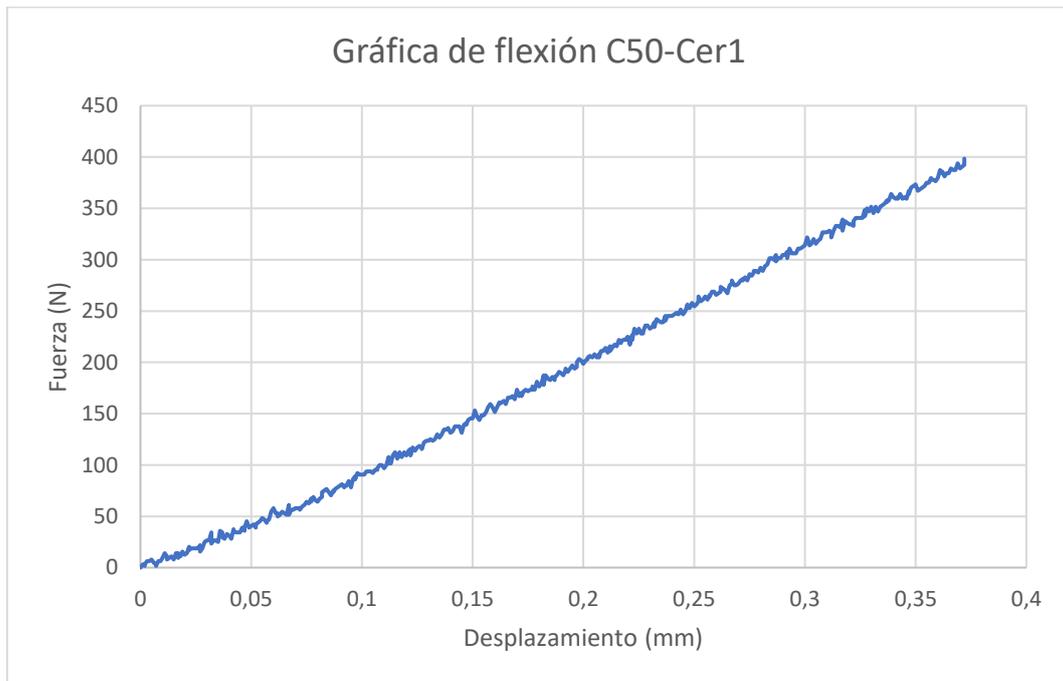
Referencias de trabajos de fin de grado:

[10] Alejandro Javier del Médico Bravo, “Propiedades mecánicas de componentes fabricados mediante modelado por deposición fundida” Trabajo Fin de Grado, Universidad de La Laguna, 2017

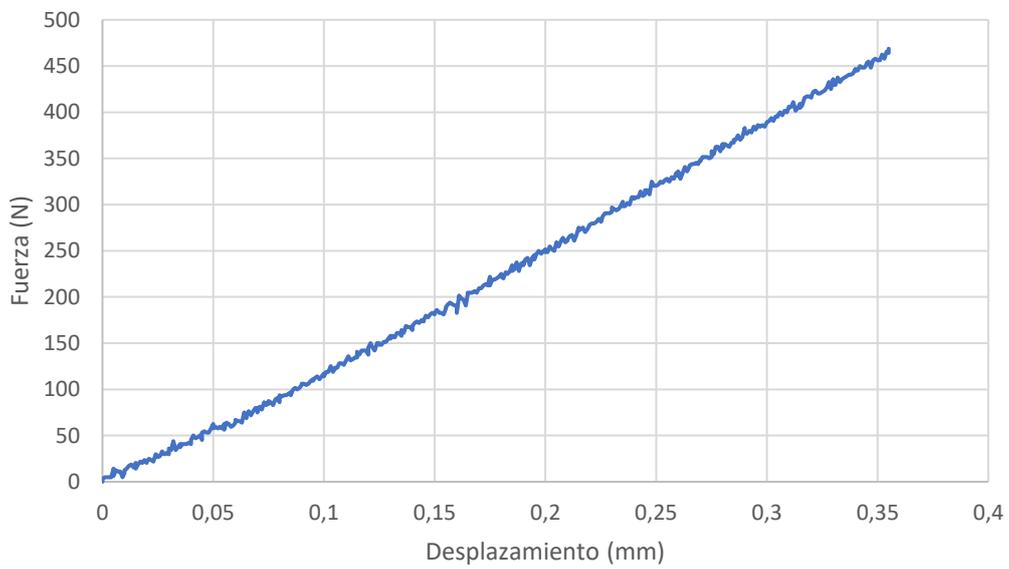
[11] Eduardo Cabello Correa. “Estudio del efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas de probetas fabricadas por impresión 3D mediante FDM” Trabajo de Din de Grado, Universidad de La Laguna, 2021.

# 11. Anexo I: Gráficas de ensayos con célula de alta carga

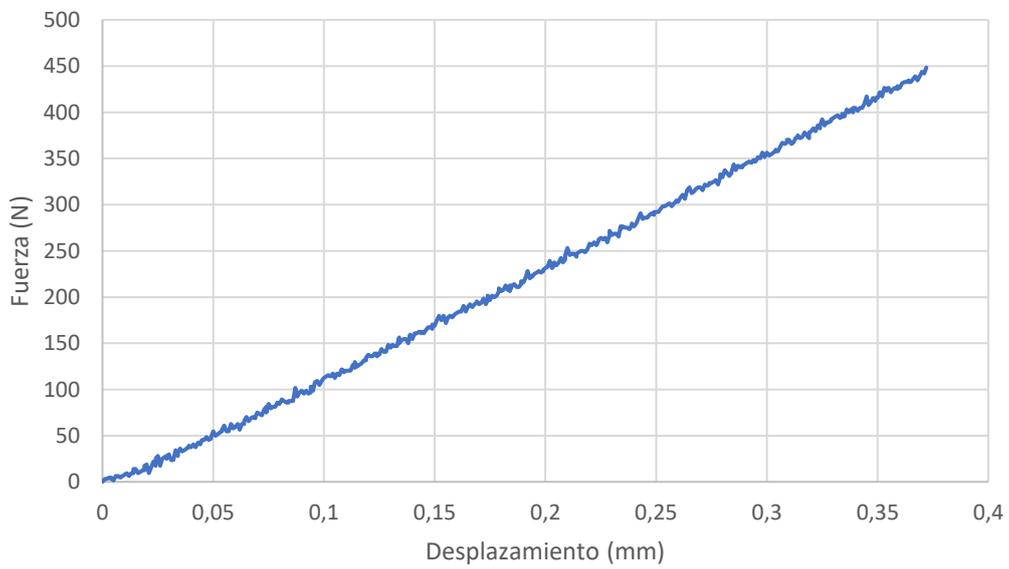
## 11.1 Gráficas de esfuerzo probetas de materiales cerámicos

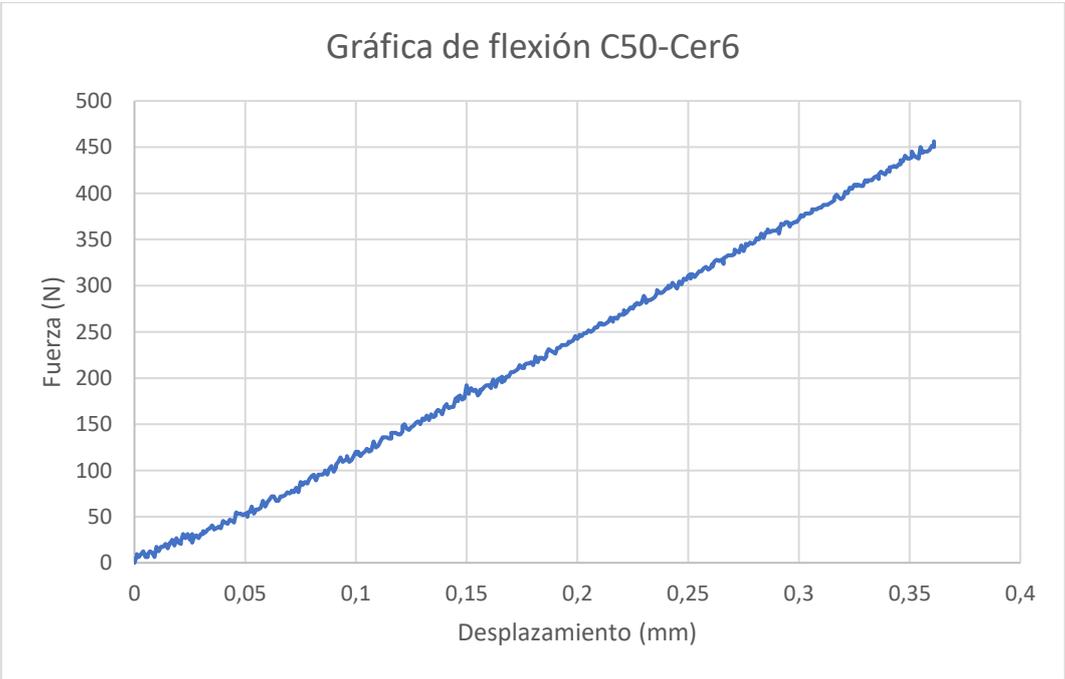
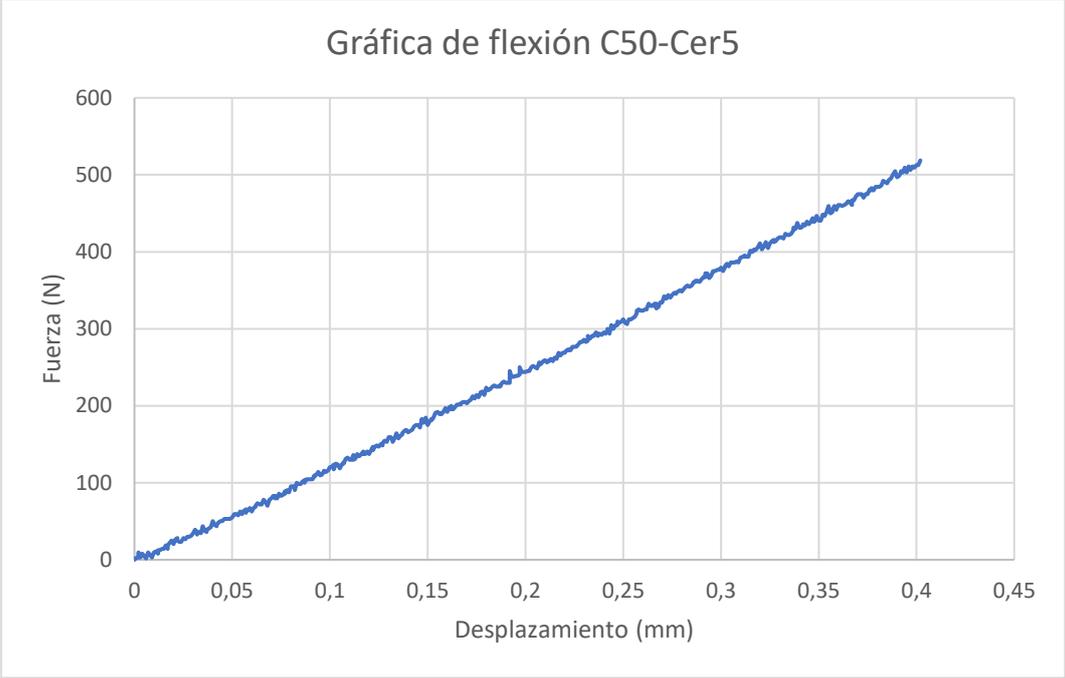


Gráfica de flexión C50-Cer3

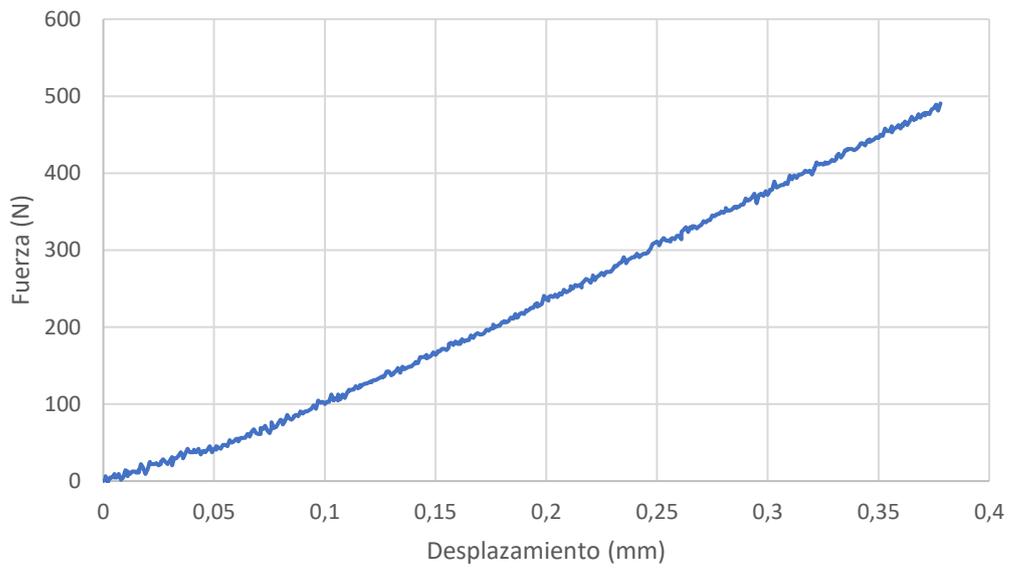


Gráfica de flexión C50-Cer4

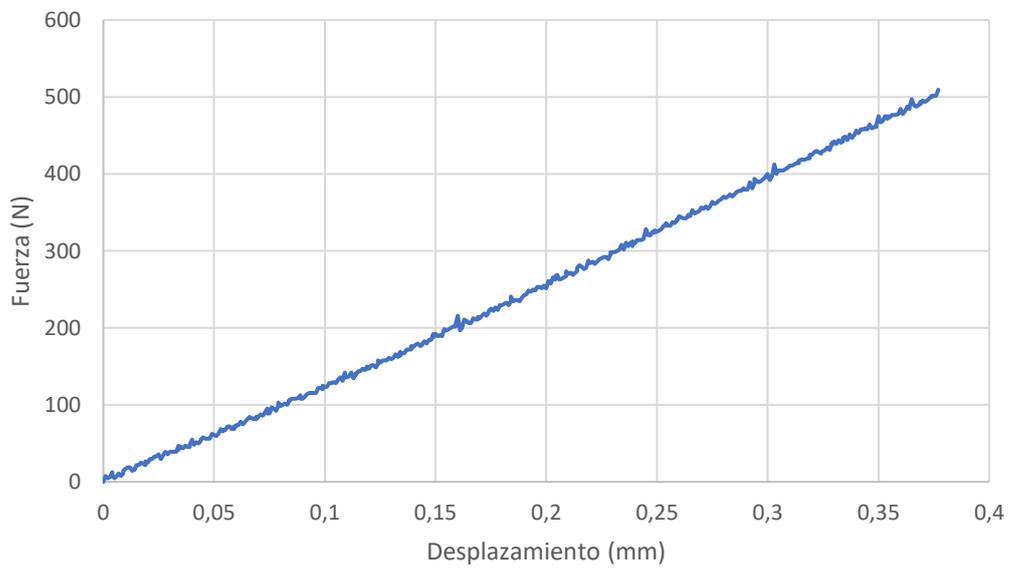




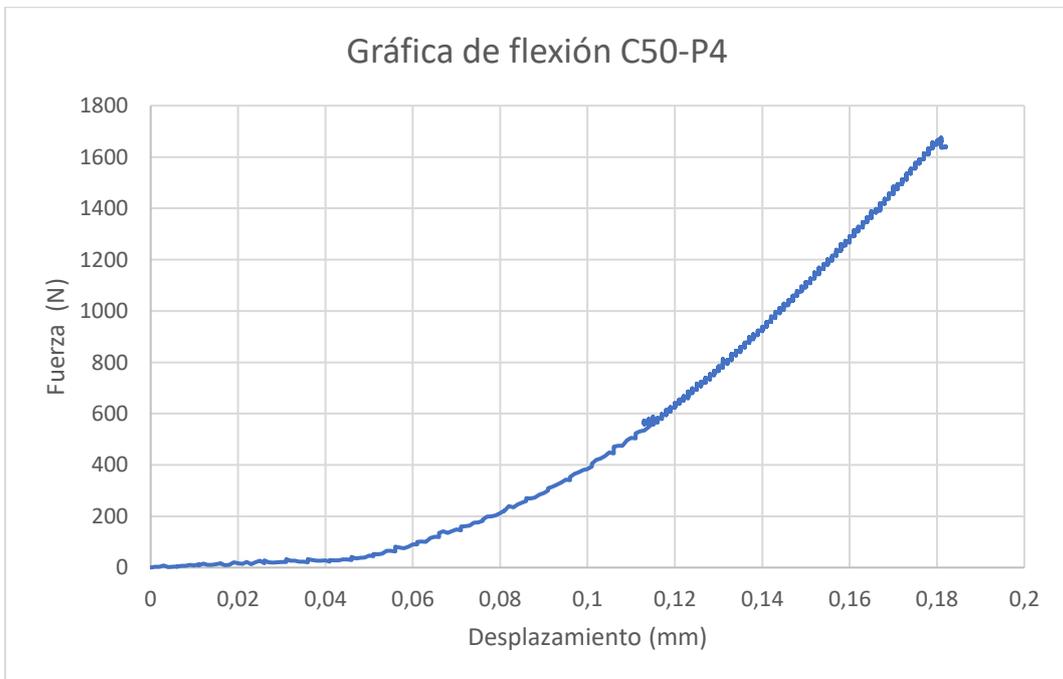
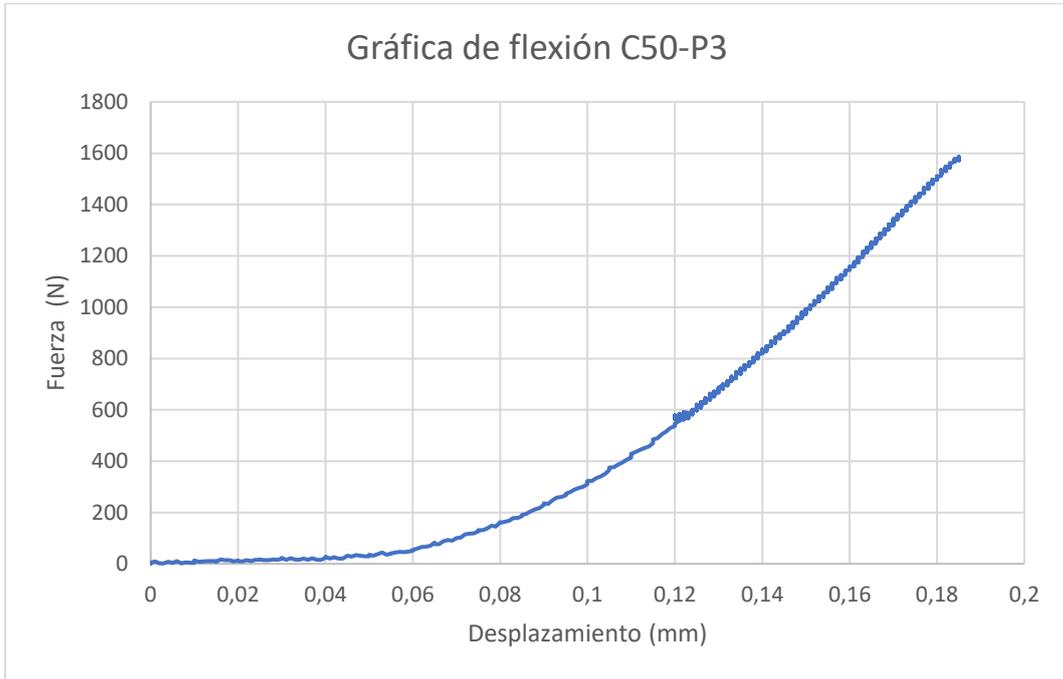
Gráfica de flexión C50-Cer7

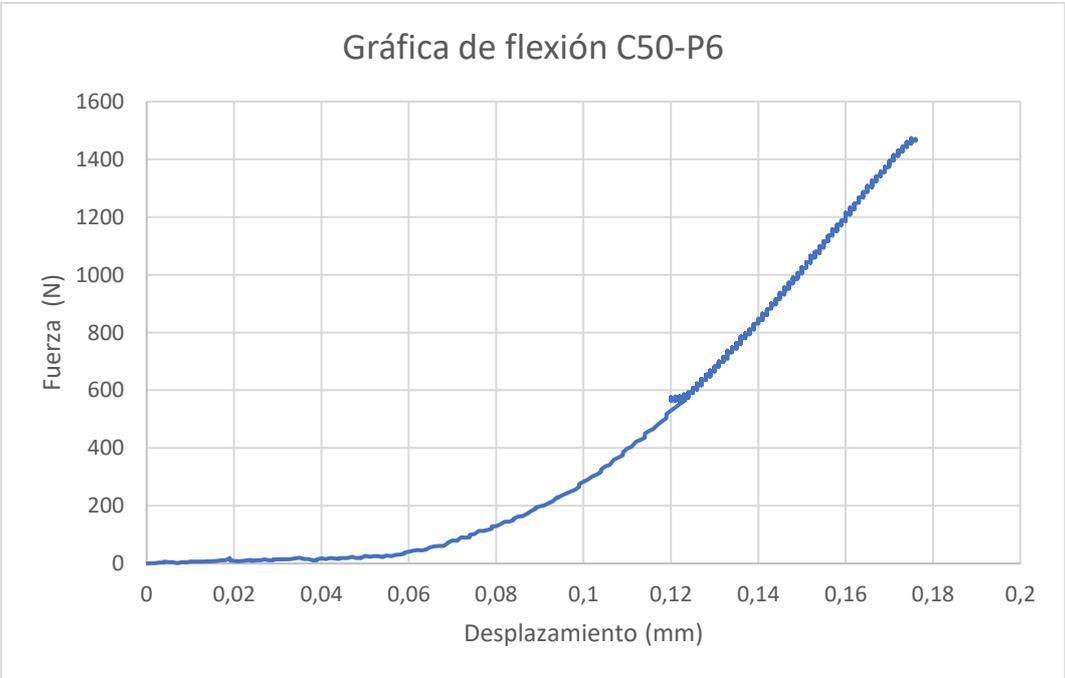
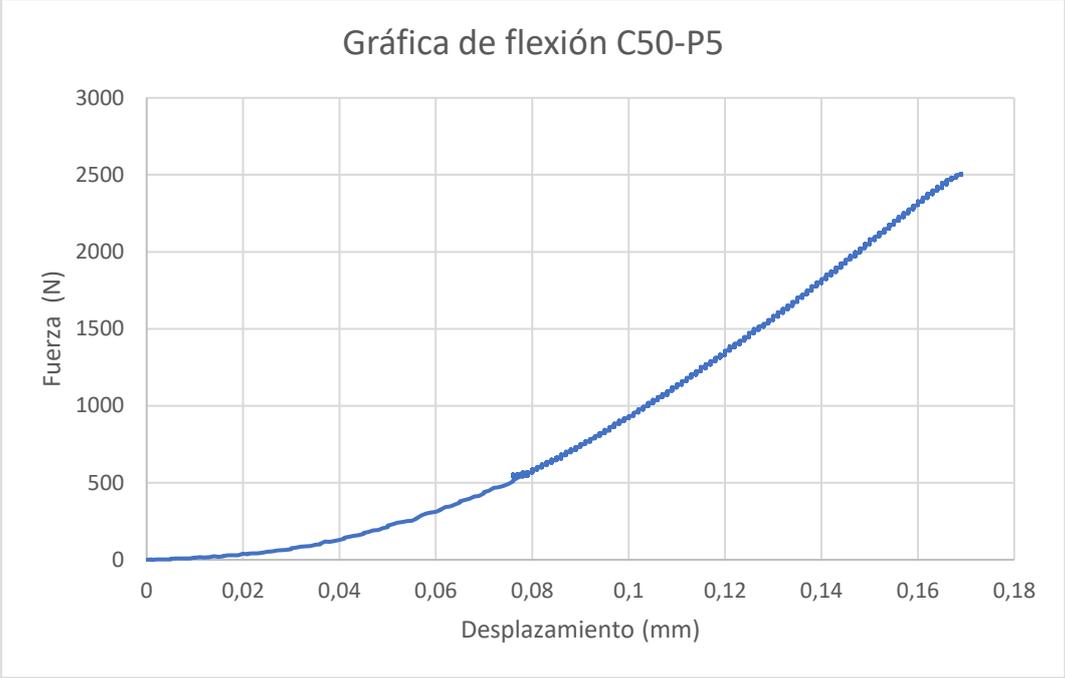


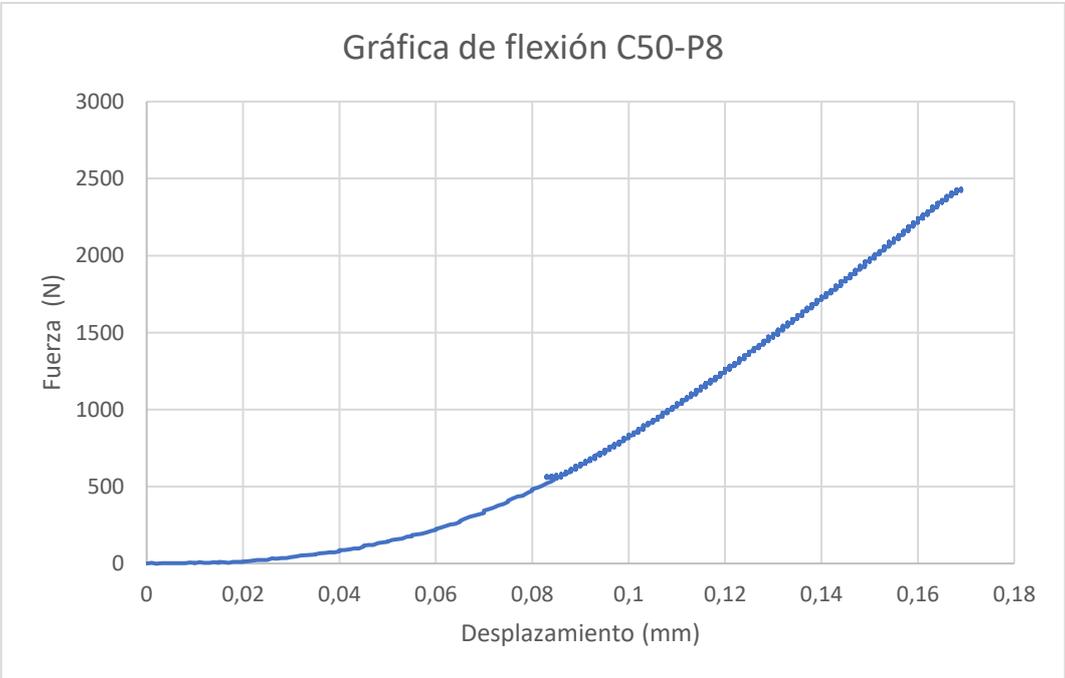
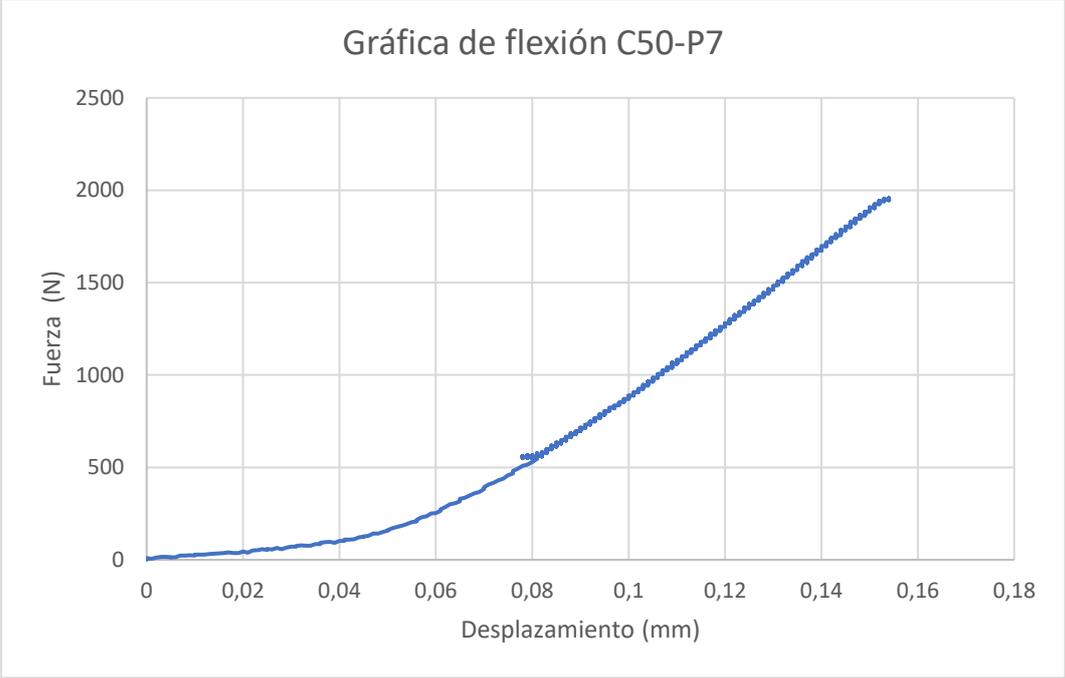
Gráfica de flexión C50-Cer8



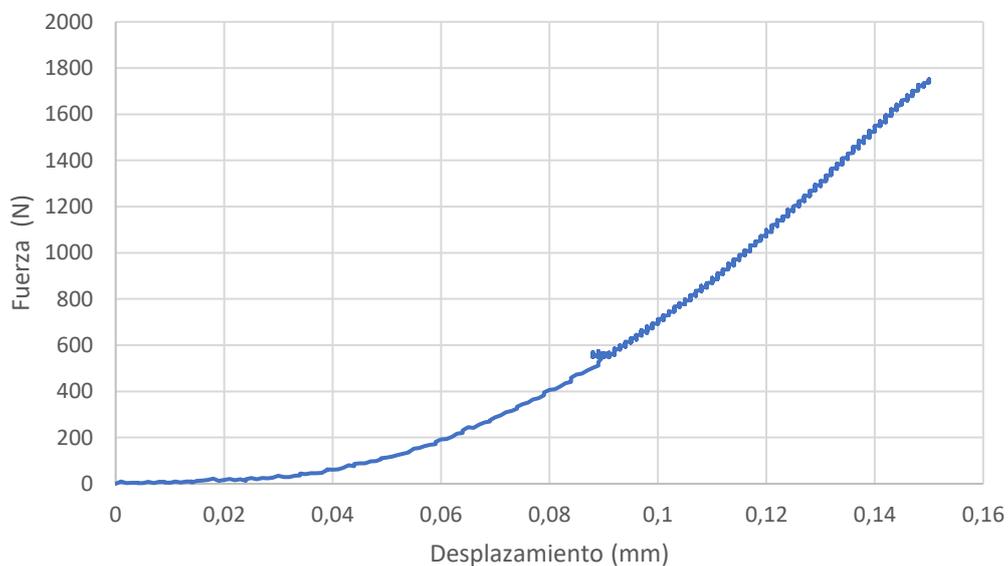
## 11.2 Gráficas de esfuerzo probetas de piedra natural



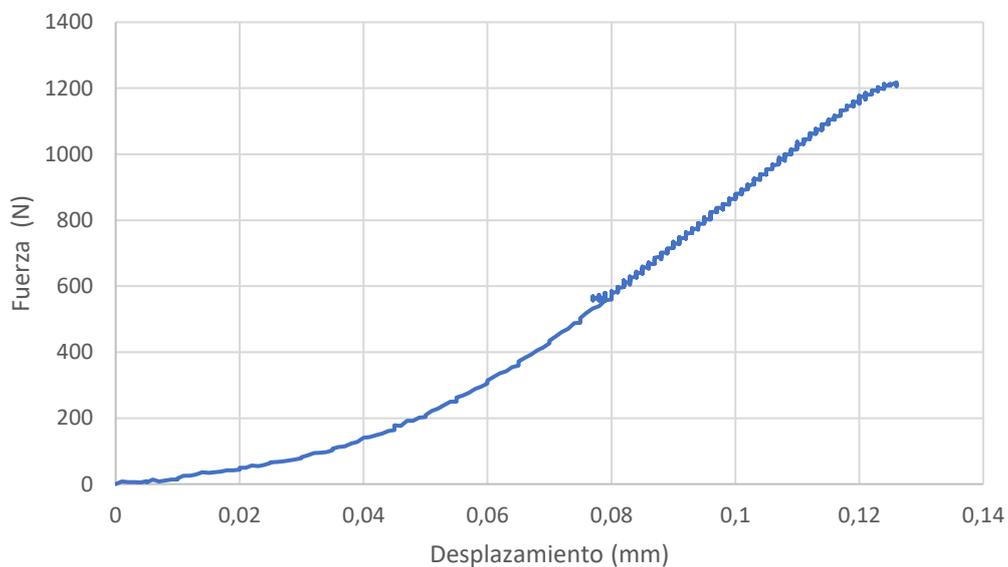




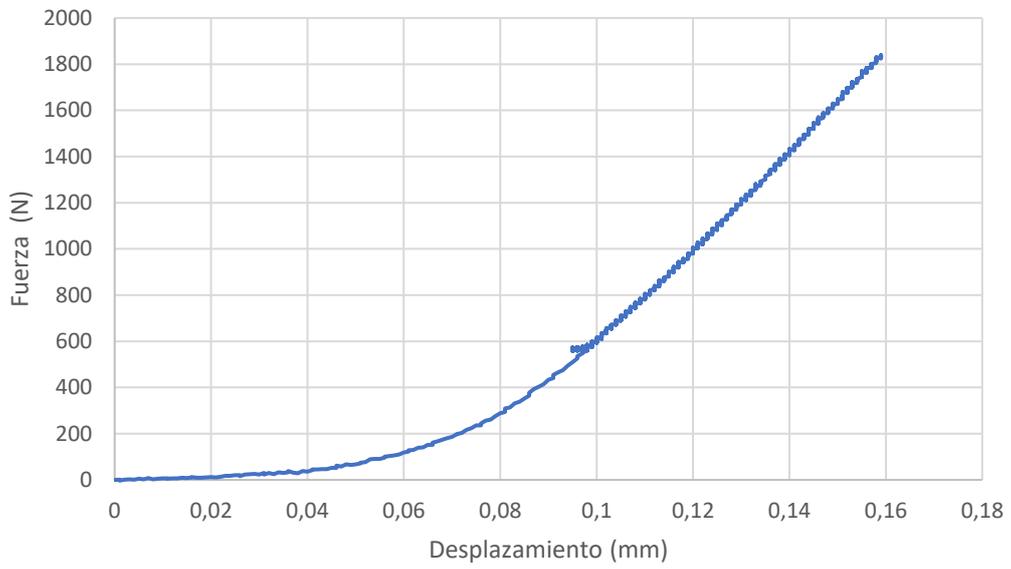
Gráfica de flexión C50-P9



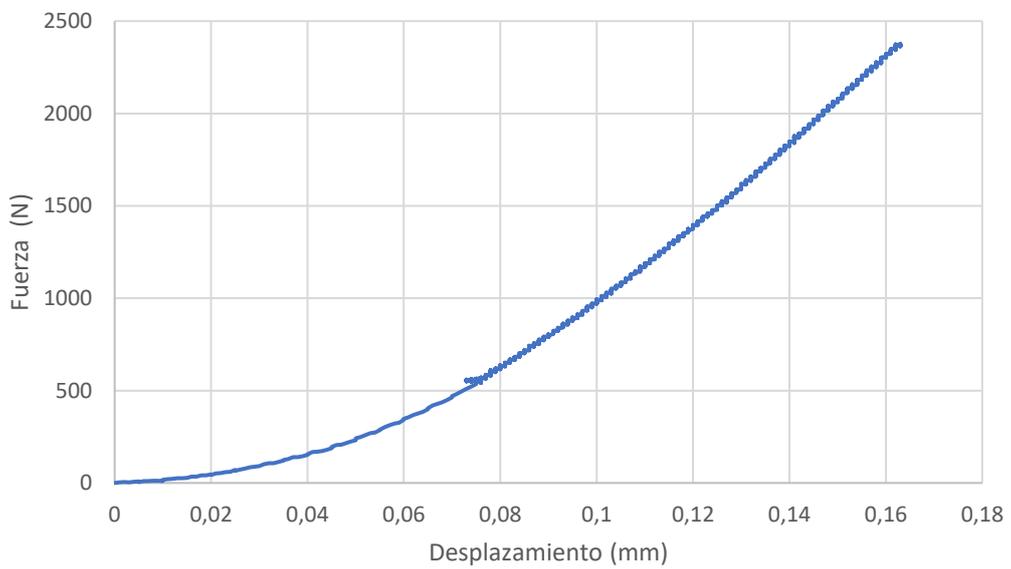
Gráfica de flexión C50-P10

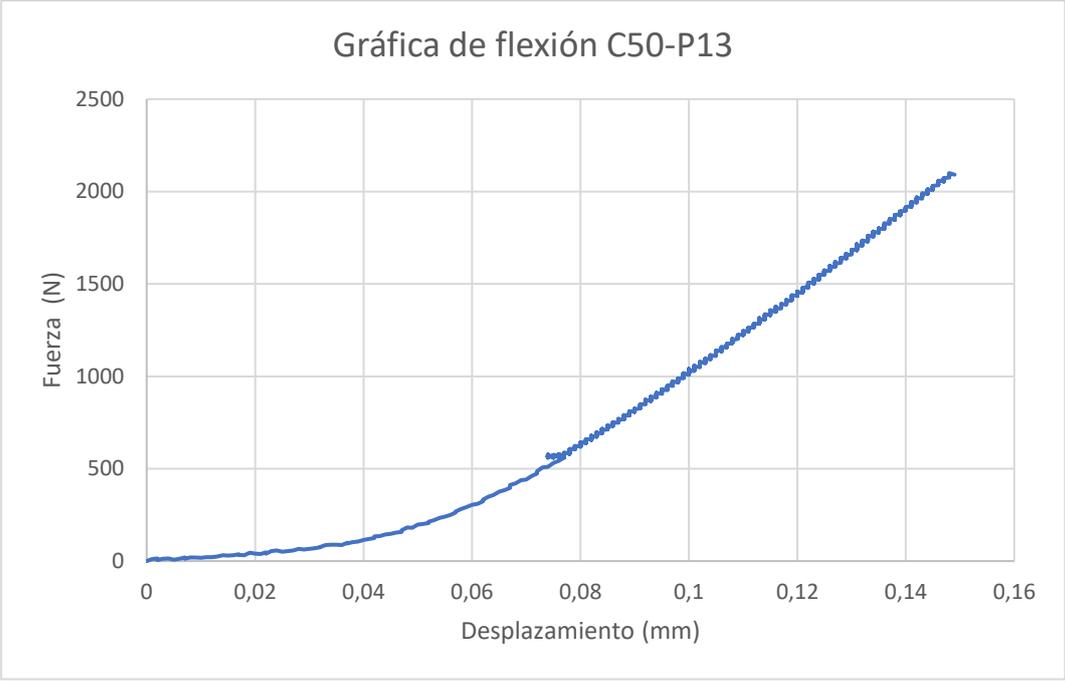


Gráfica de flexión C50-P11

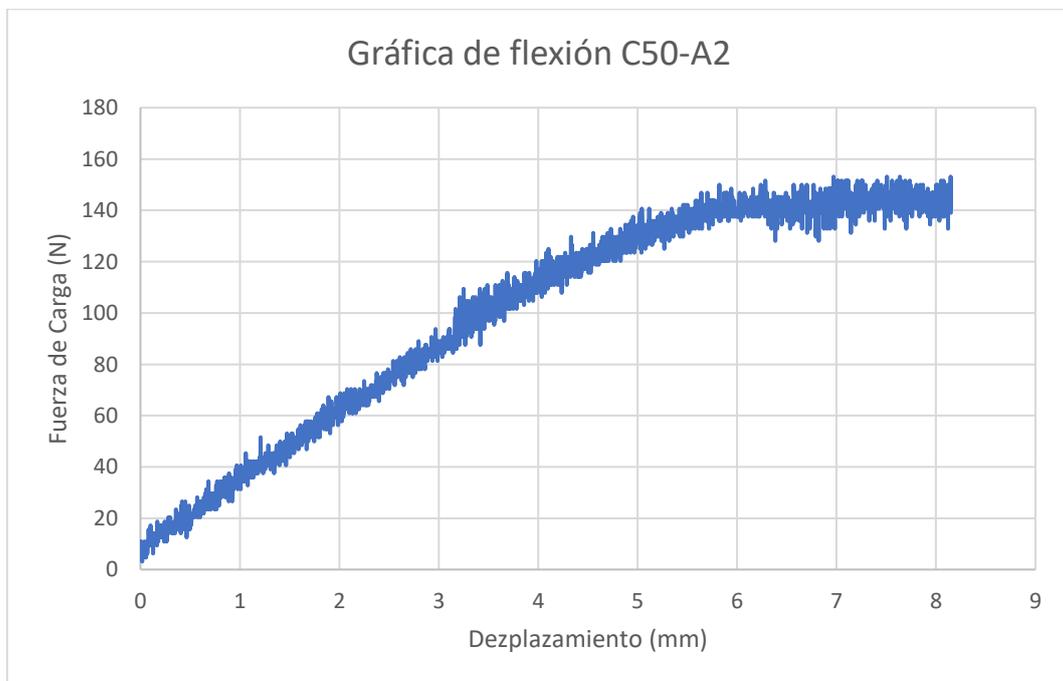
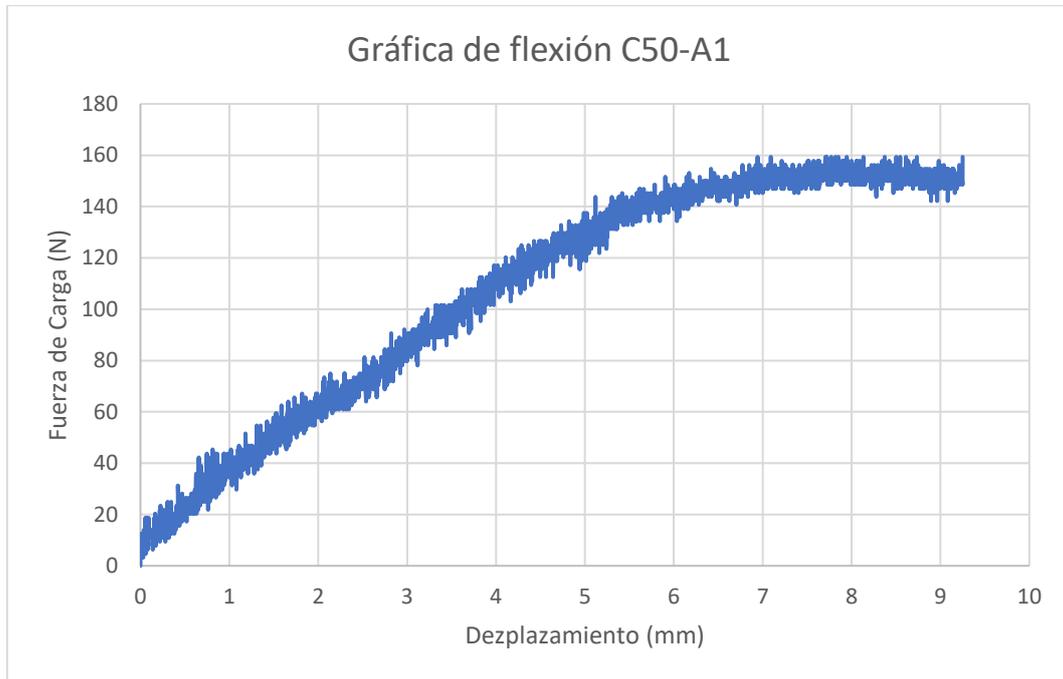


Gráfica de flexión C50-P12

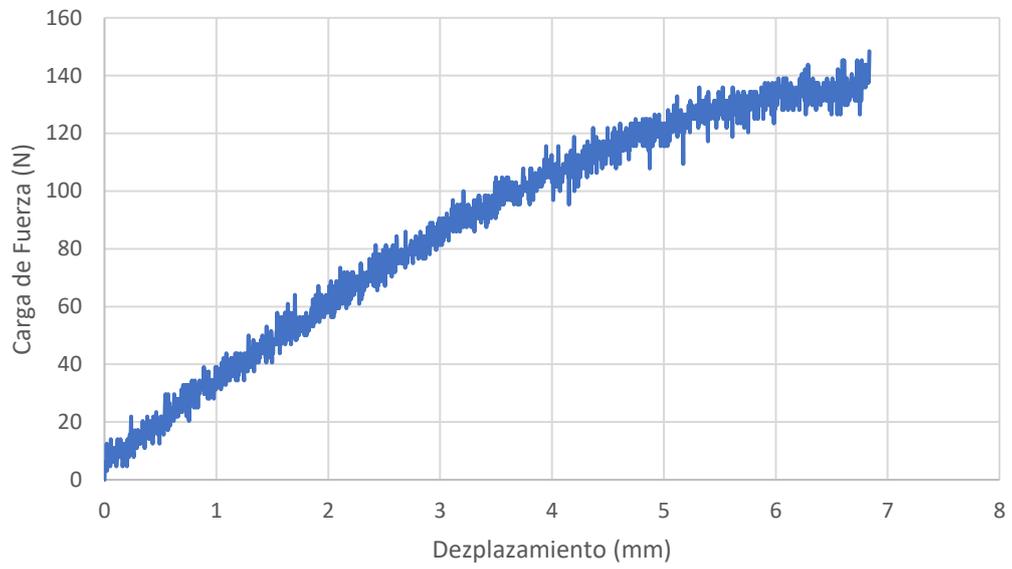




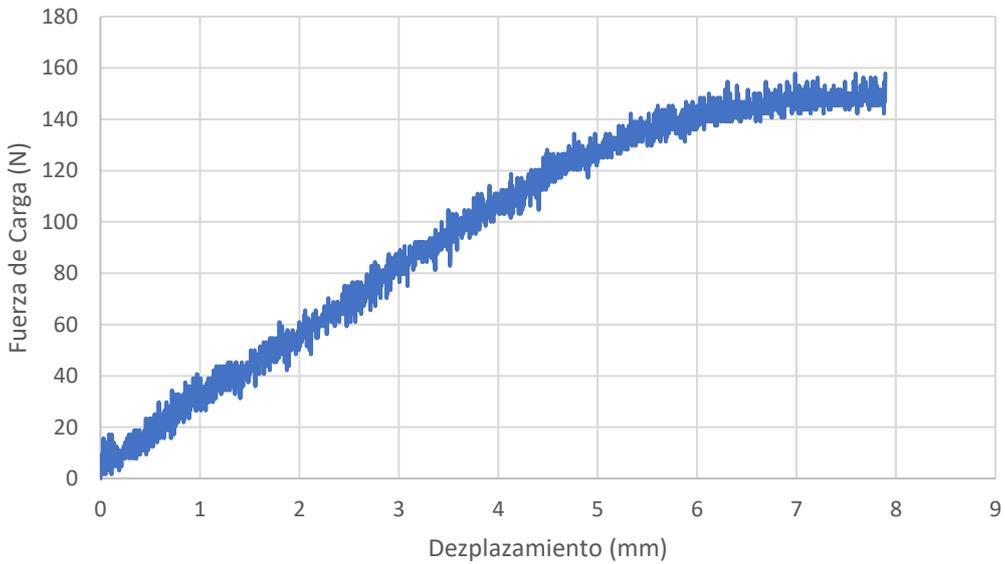
### 11.3 Ensayos con probetas de PLA



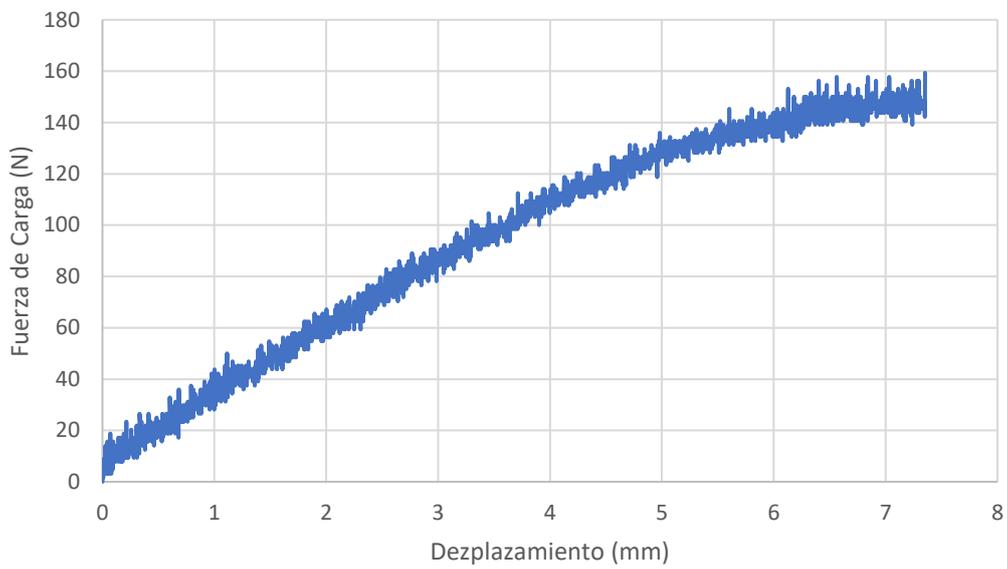
Gráfica de flexión C50-A3



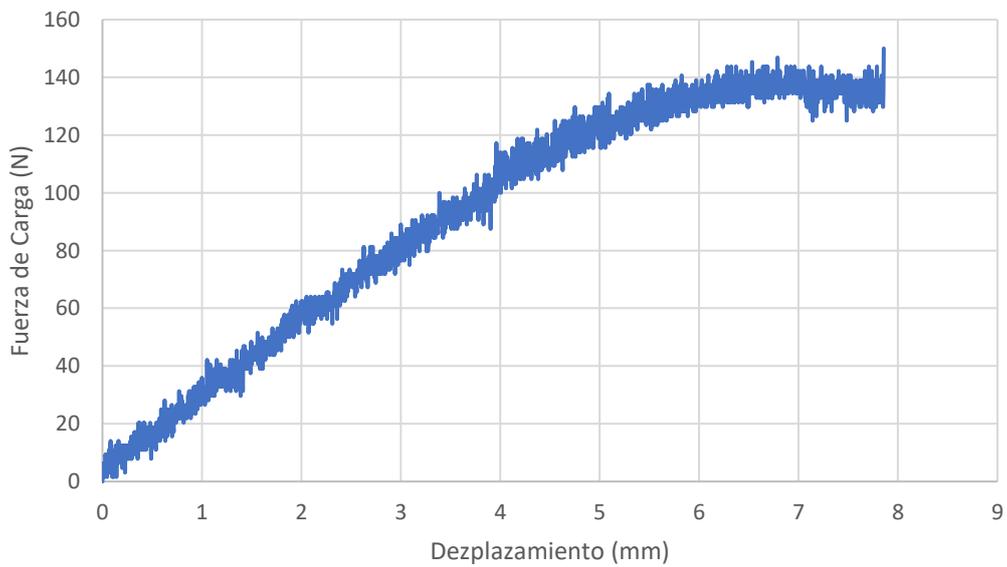
Gráfica de flexión C50-A4



Gráfica de flexión C50-A5

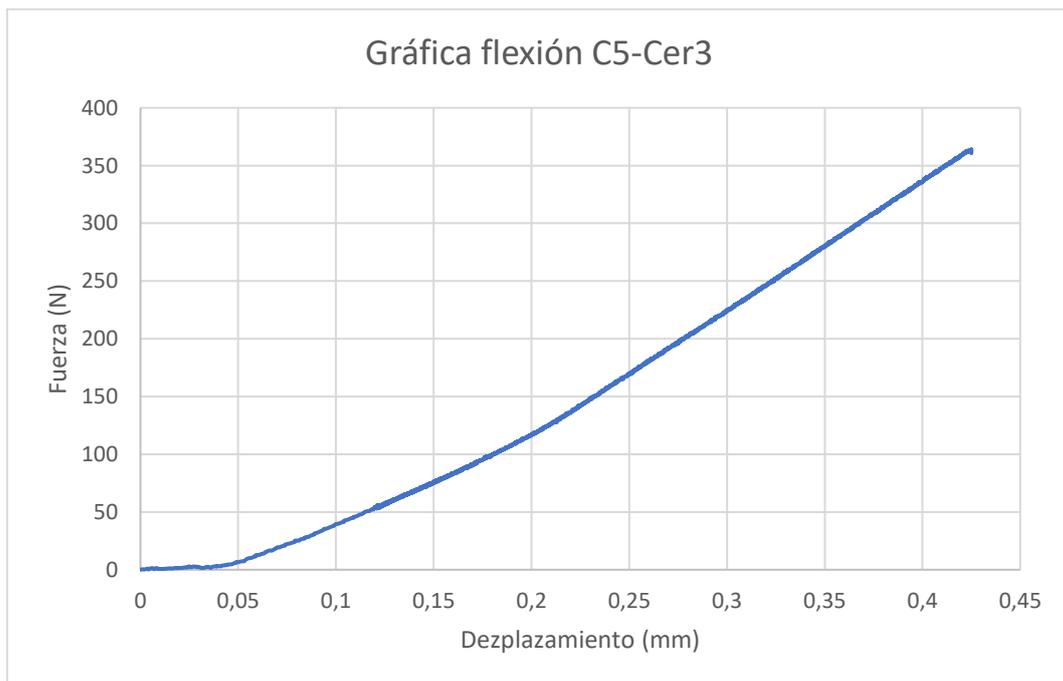
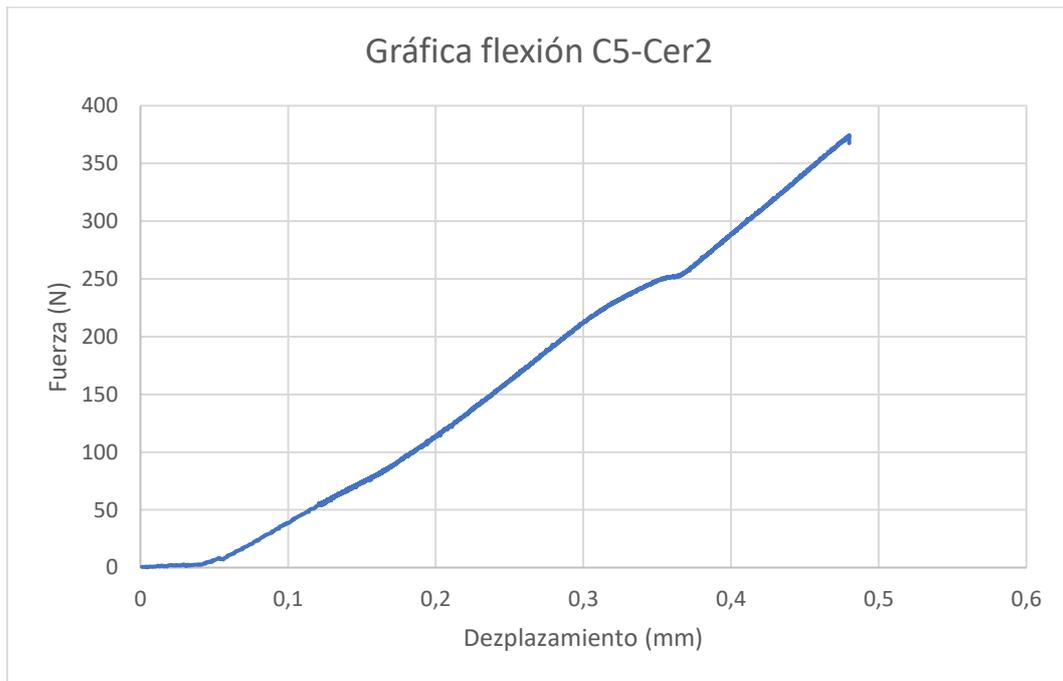


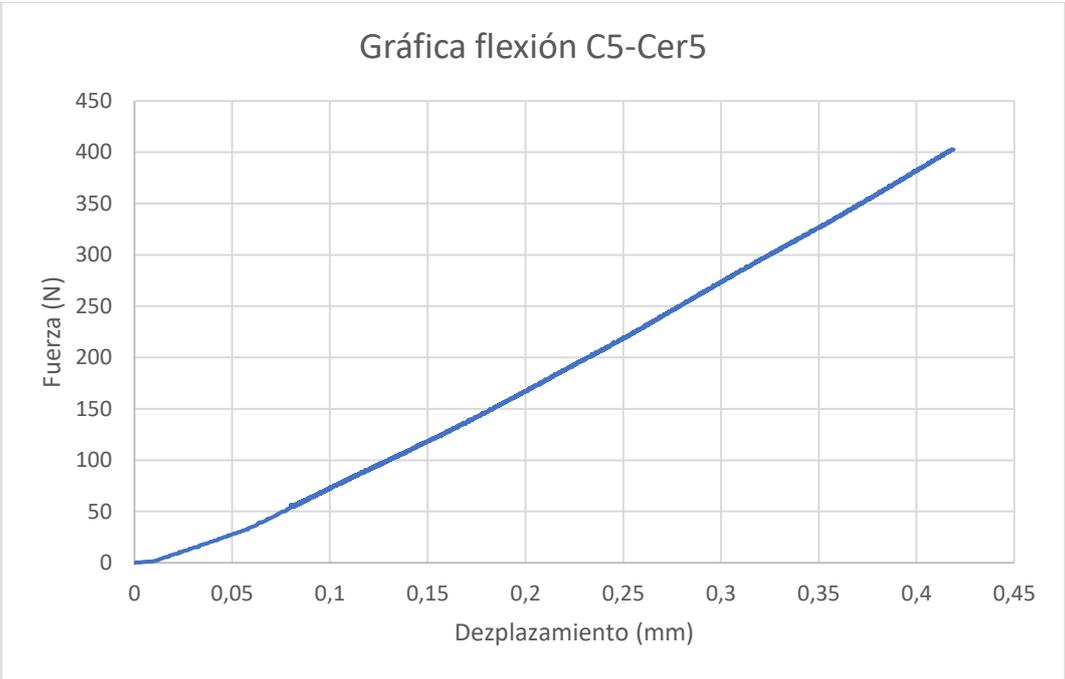
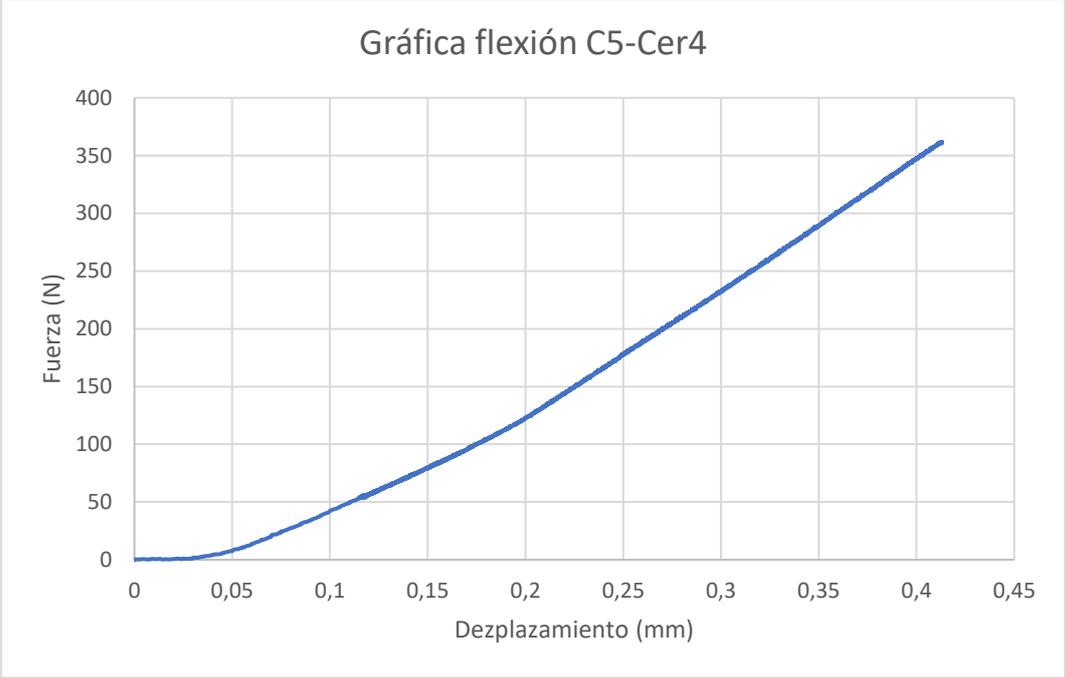
Gráfica de flexión C50-A6



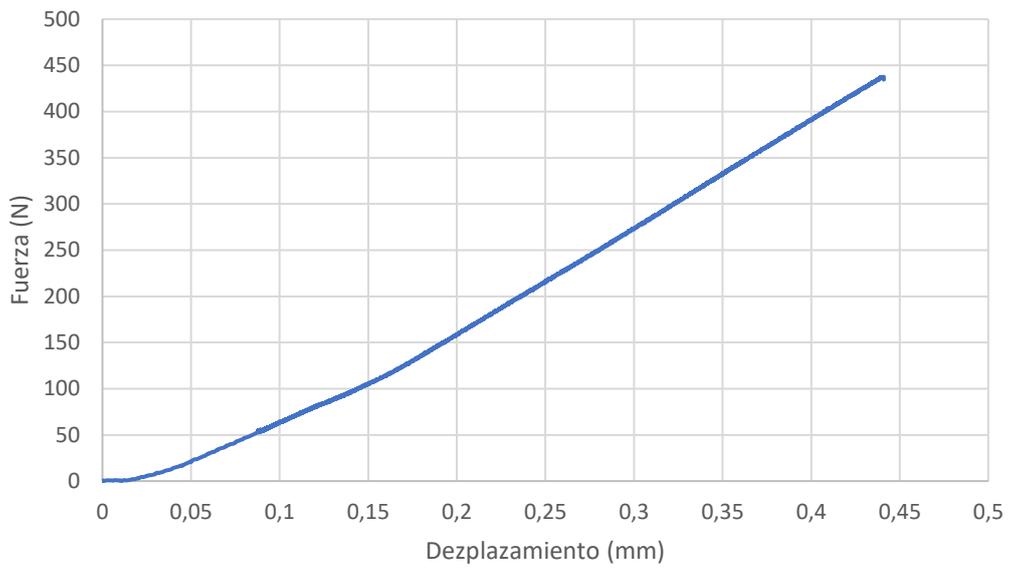
## 12. Anexo II: Gráficas de ensayo con célula de baja carga

### 12.1 Gráficas de esfuerzo de probetas de materiales cerámicos

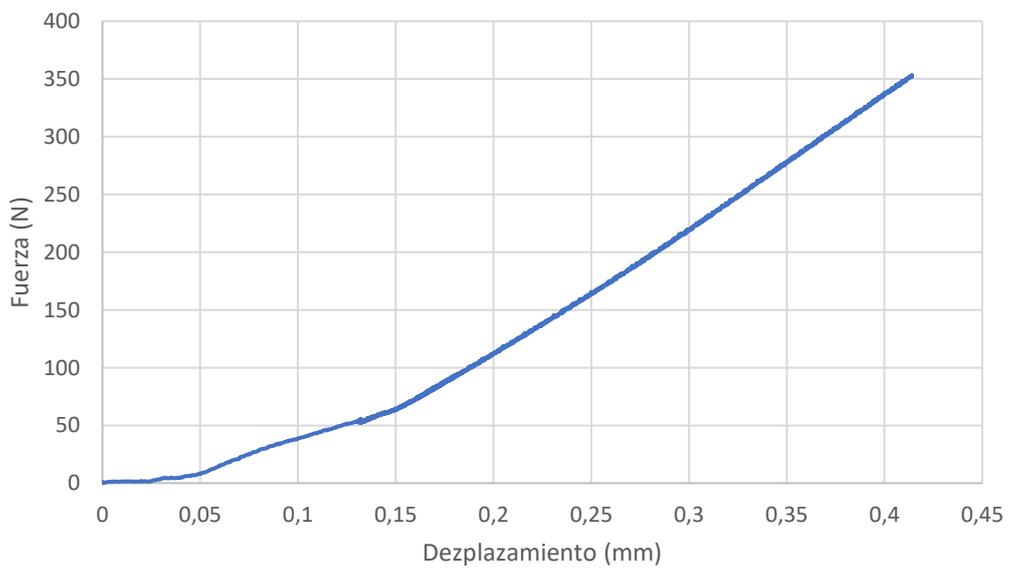


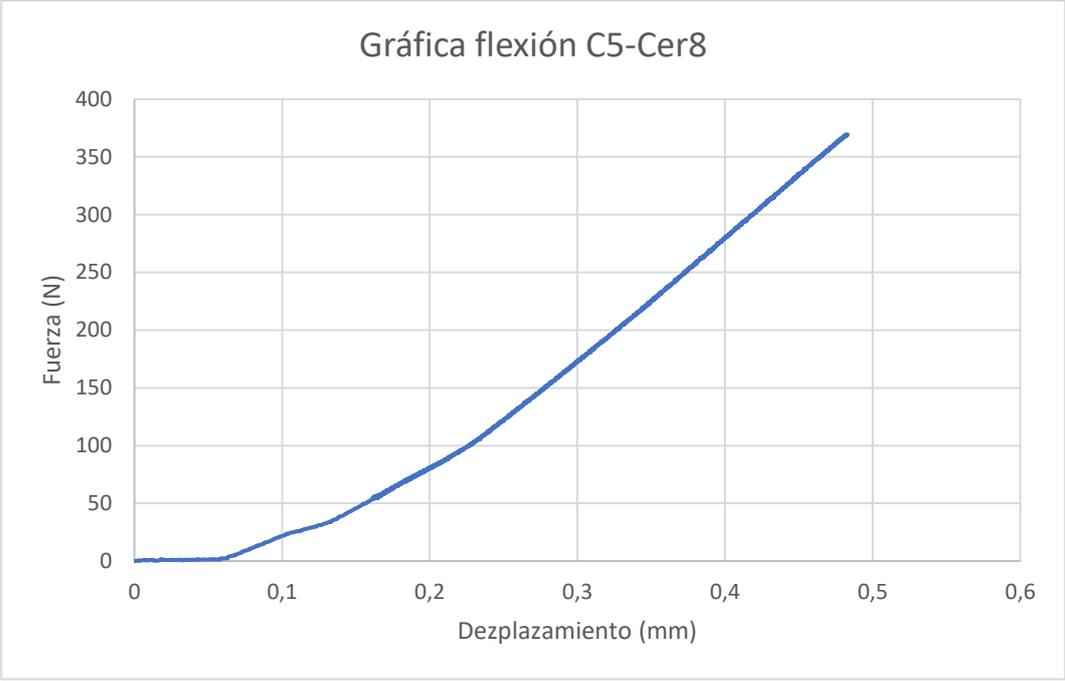


Gráfica flexión C5-Cer6

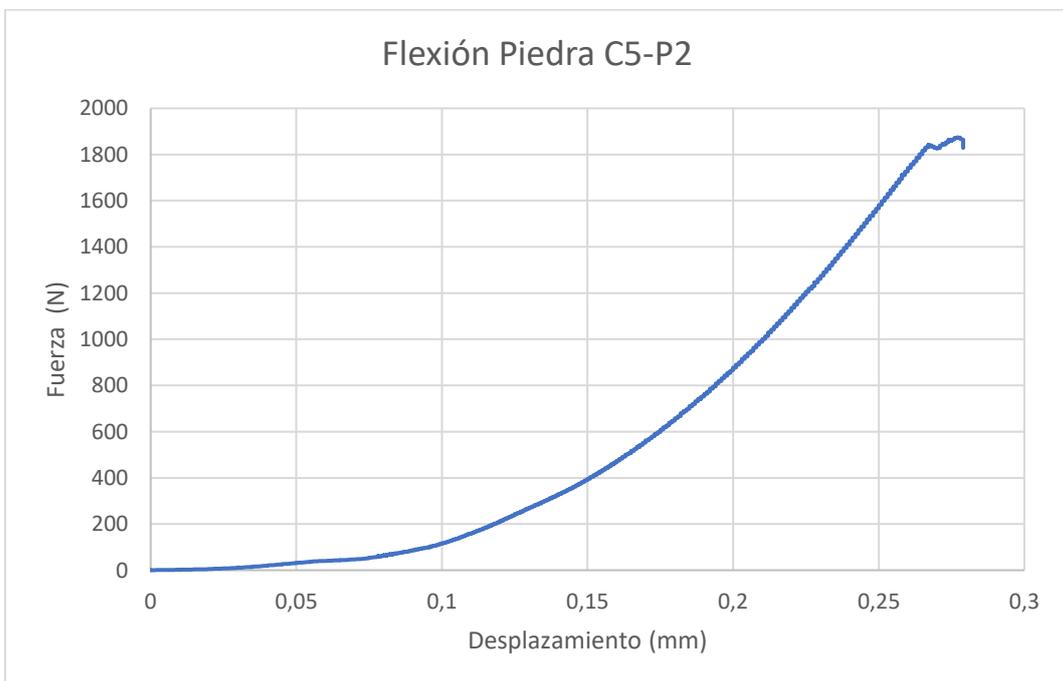
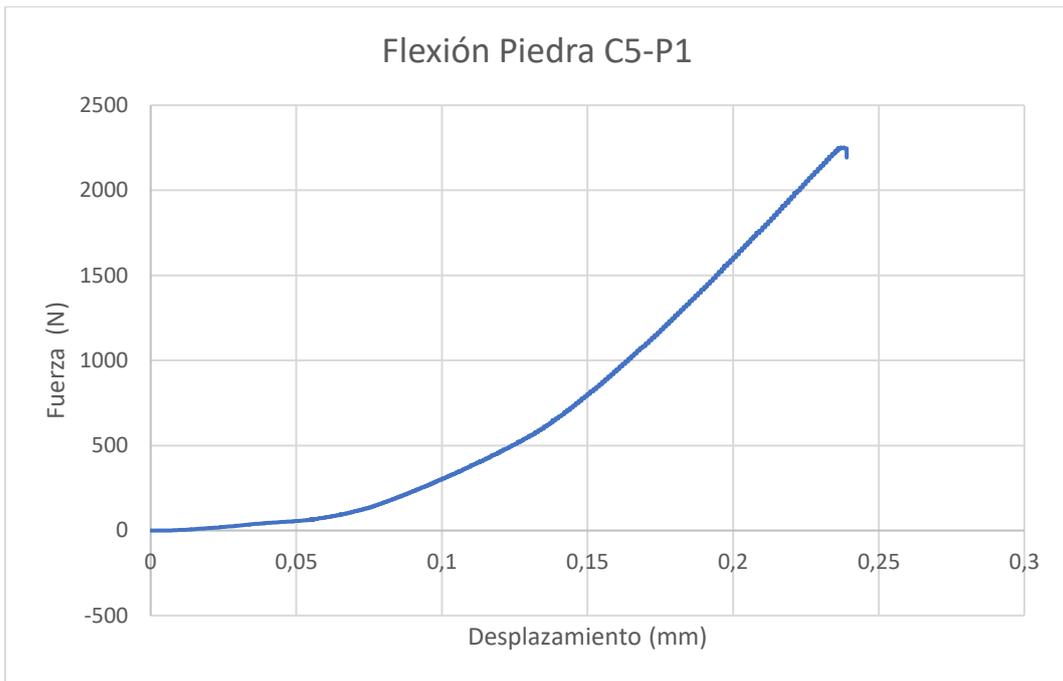


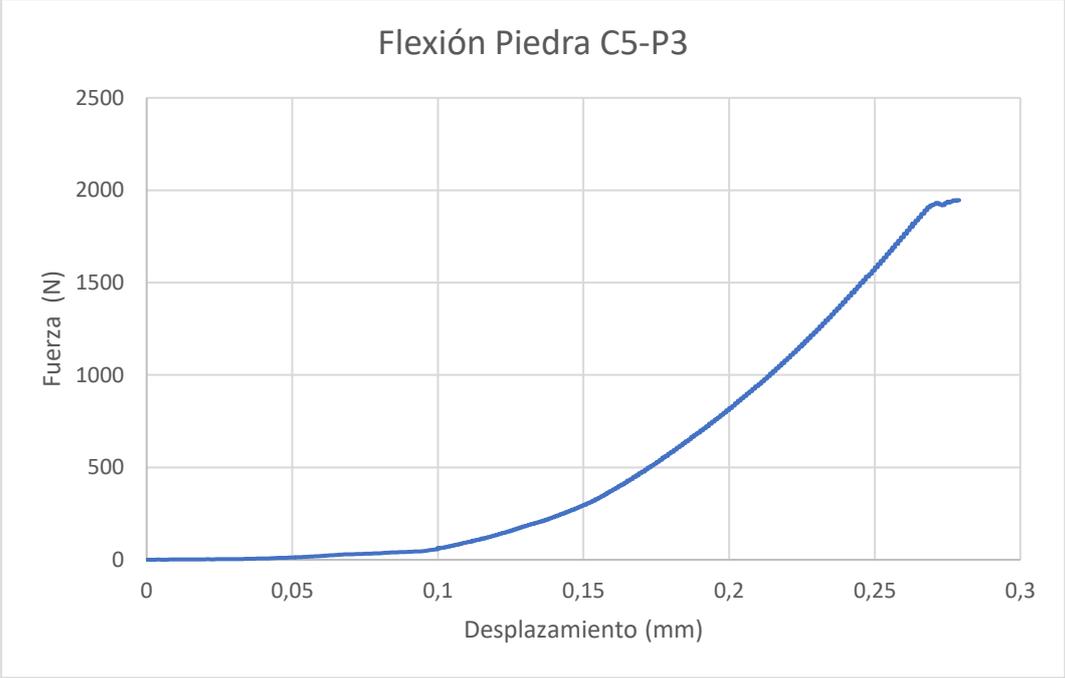
Gráfica flexión C5-Cer7

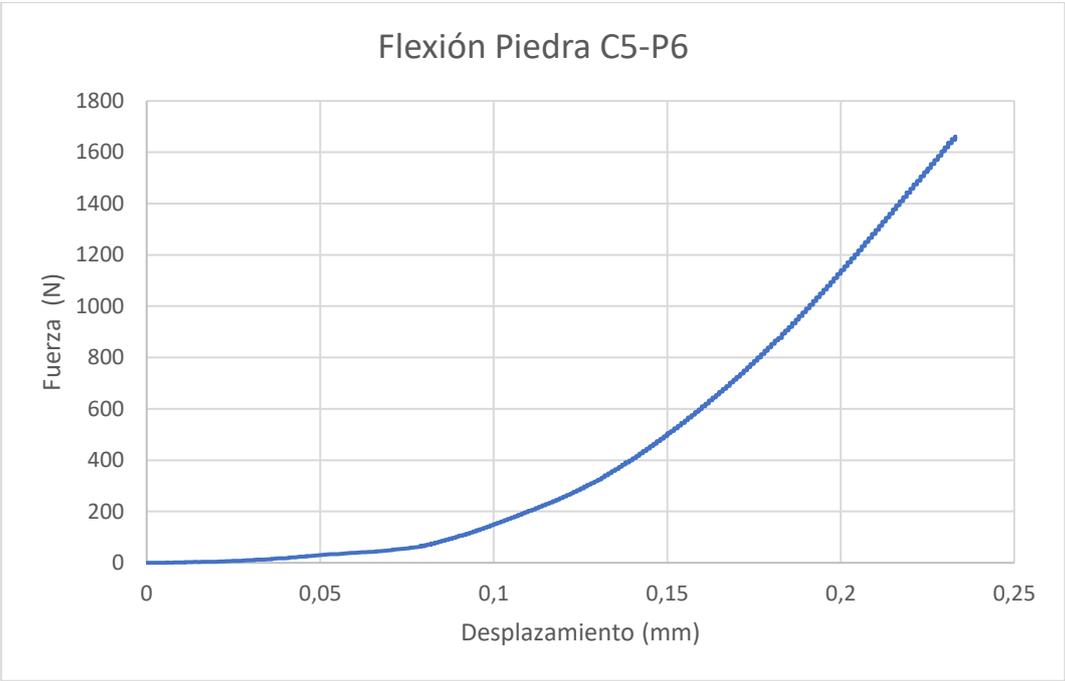
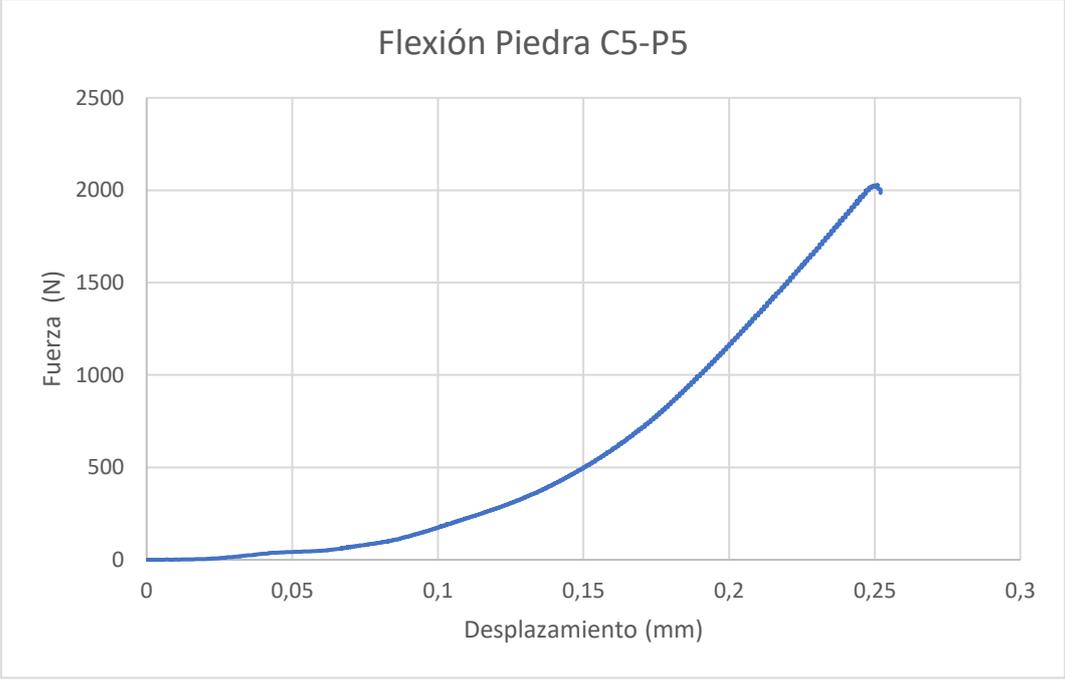


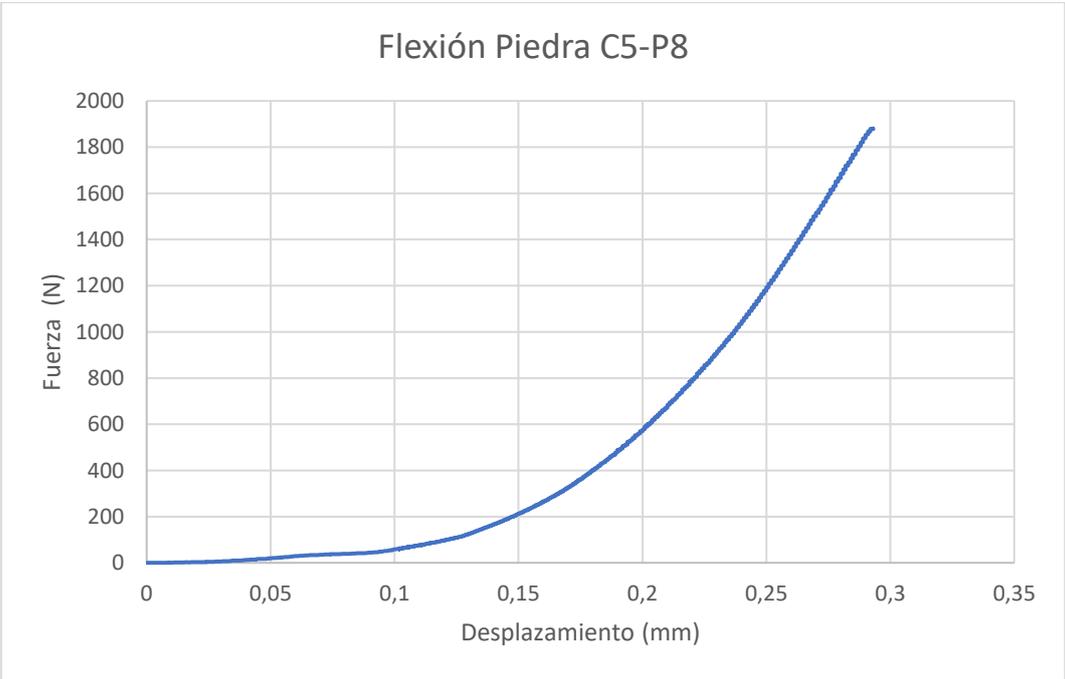
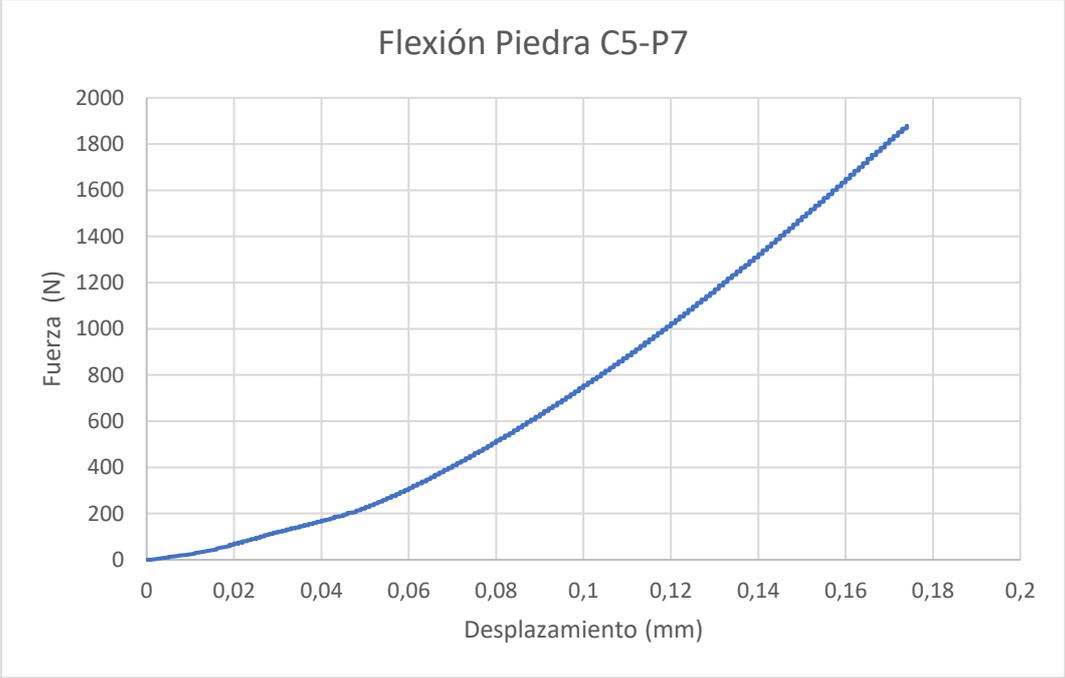


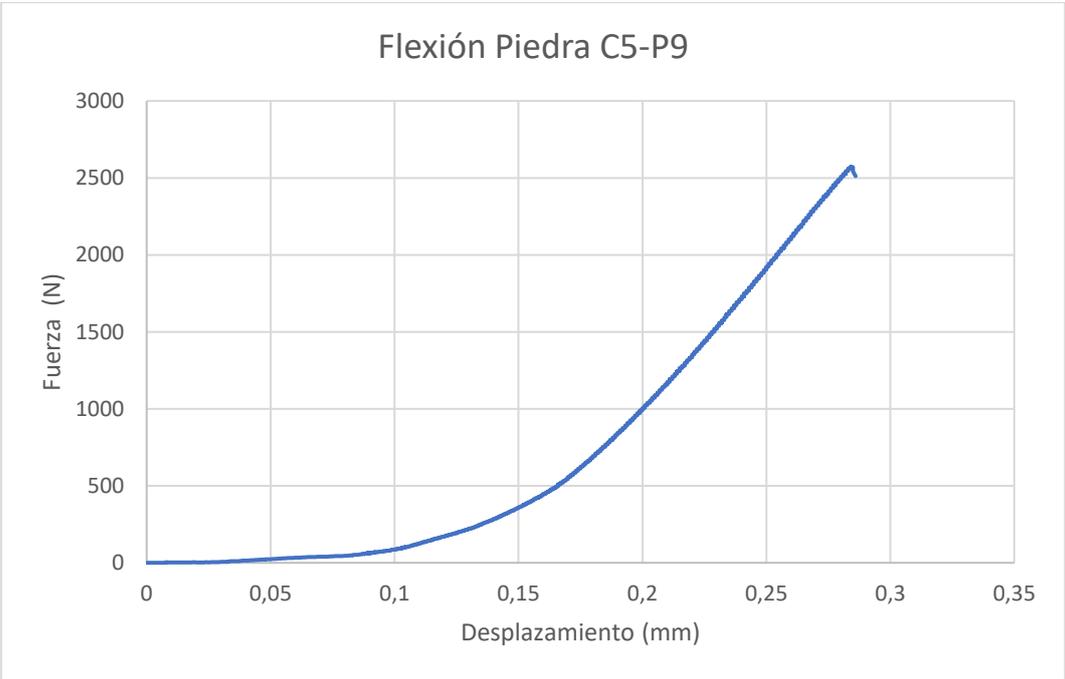
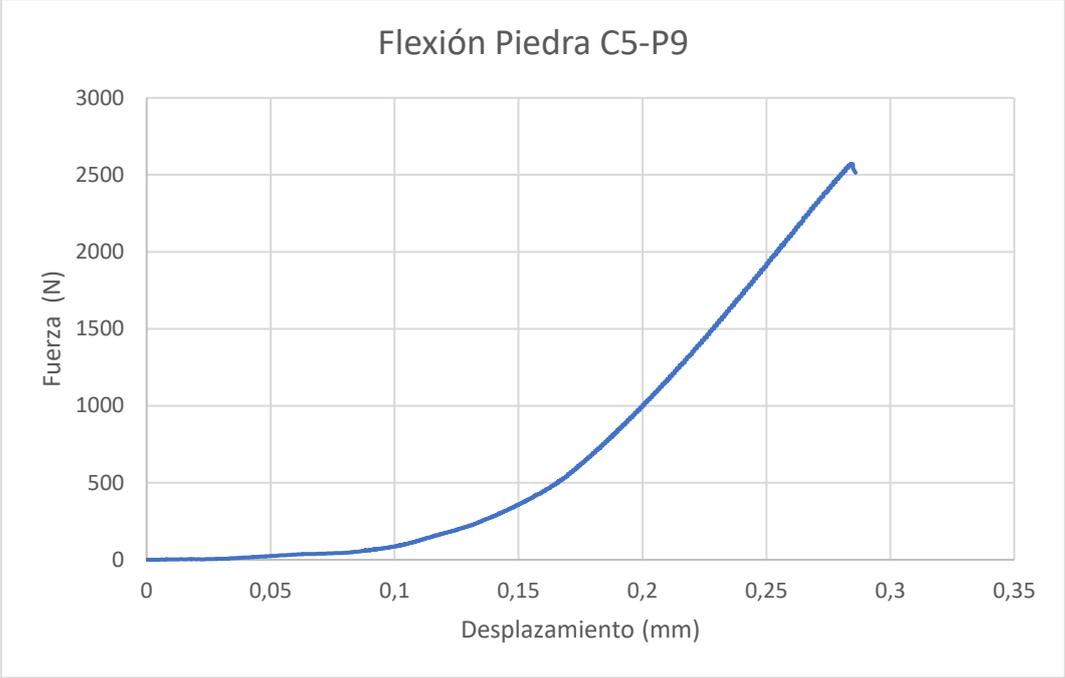
## 12.2 Gráficas de esfuerzo de probetas de piedra natural

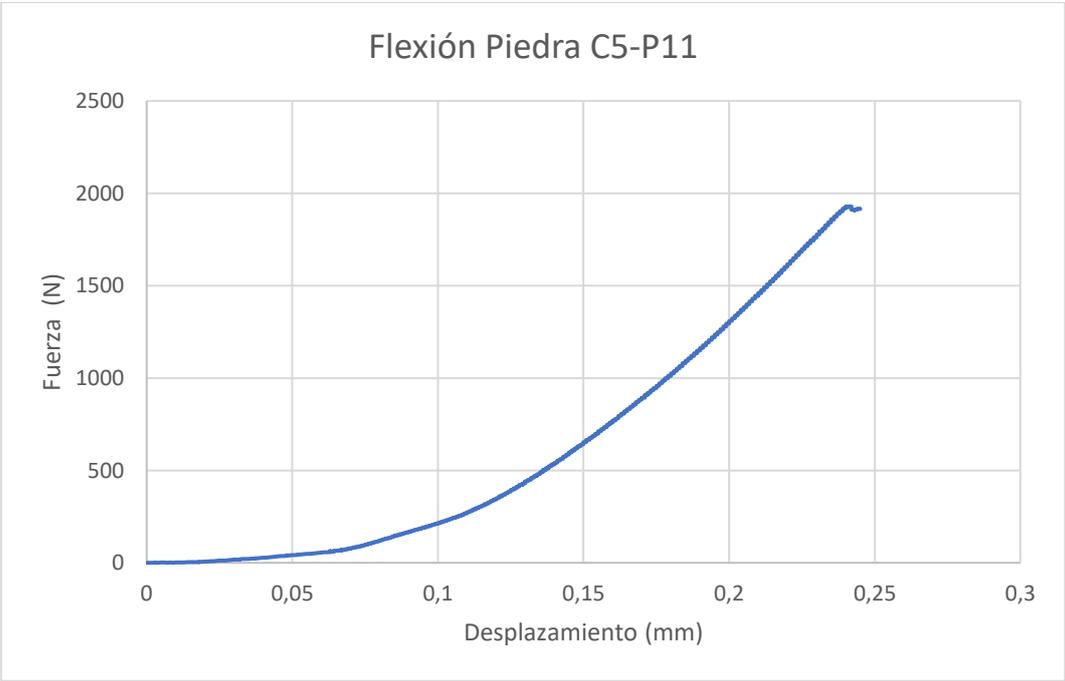
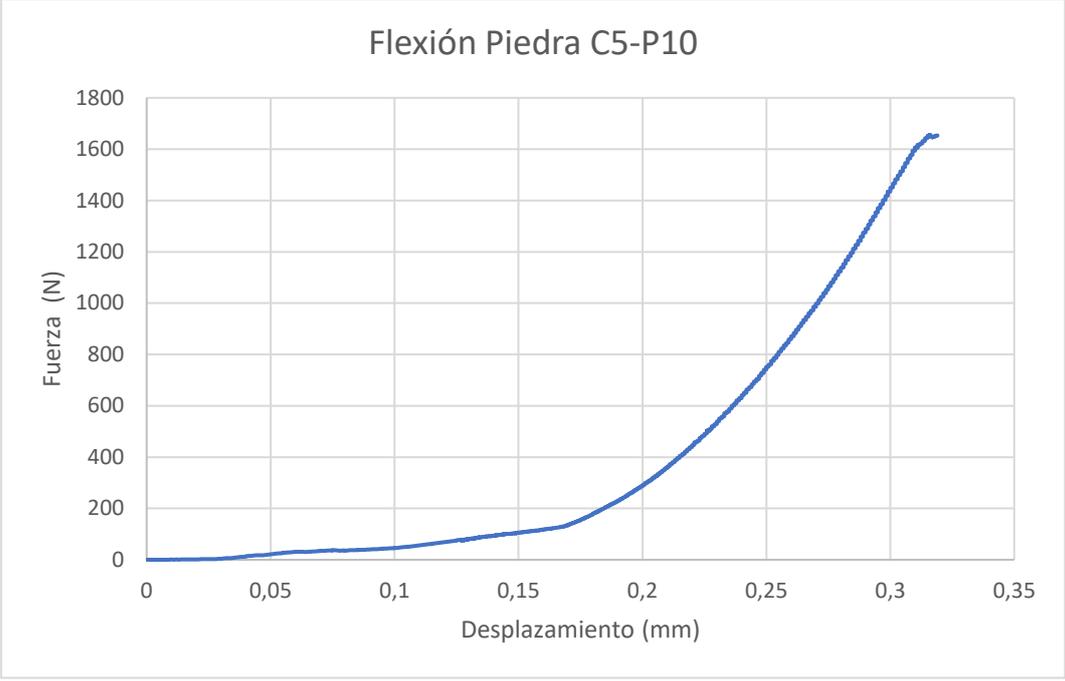


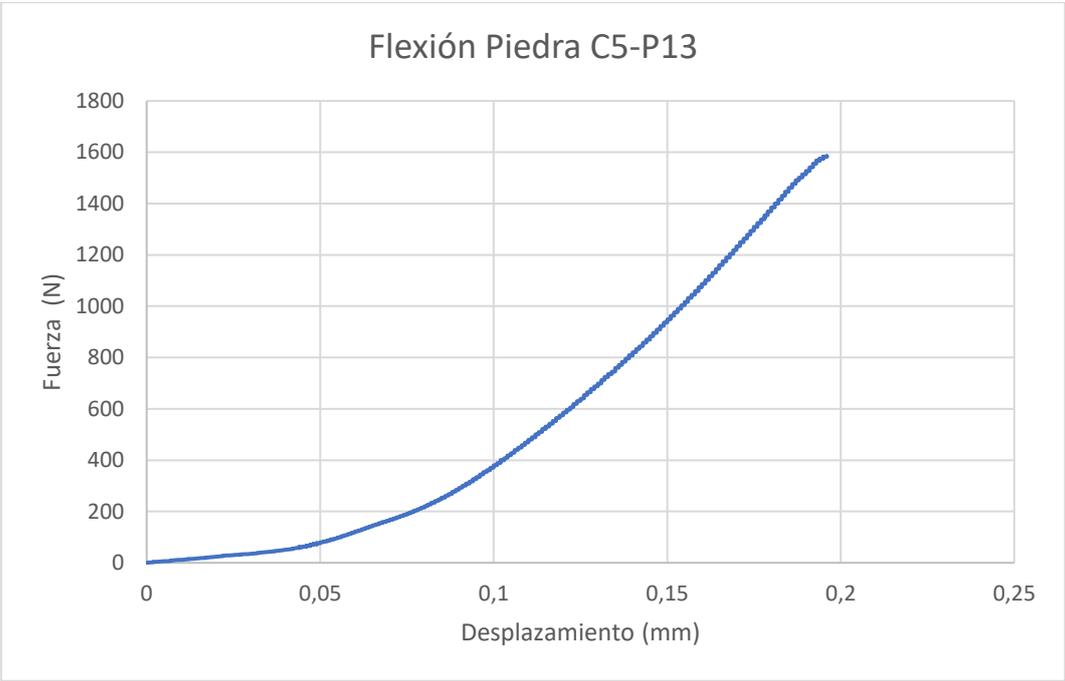
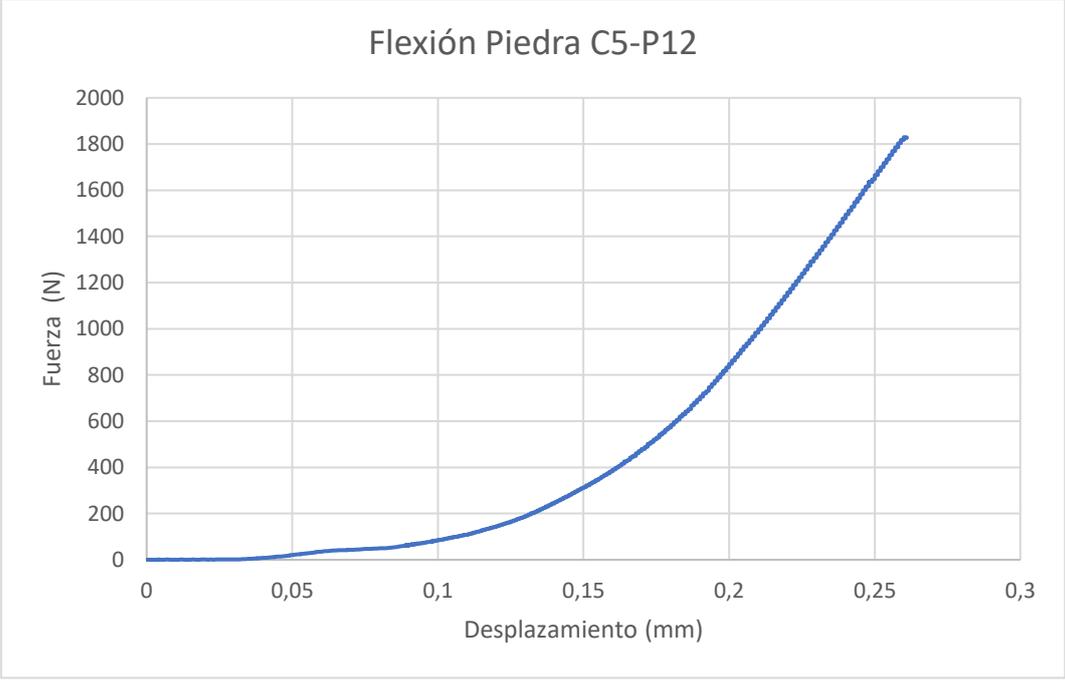




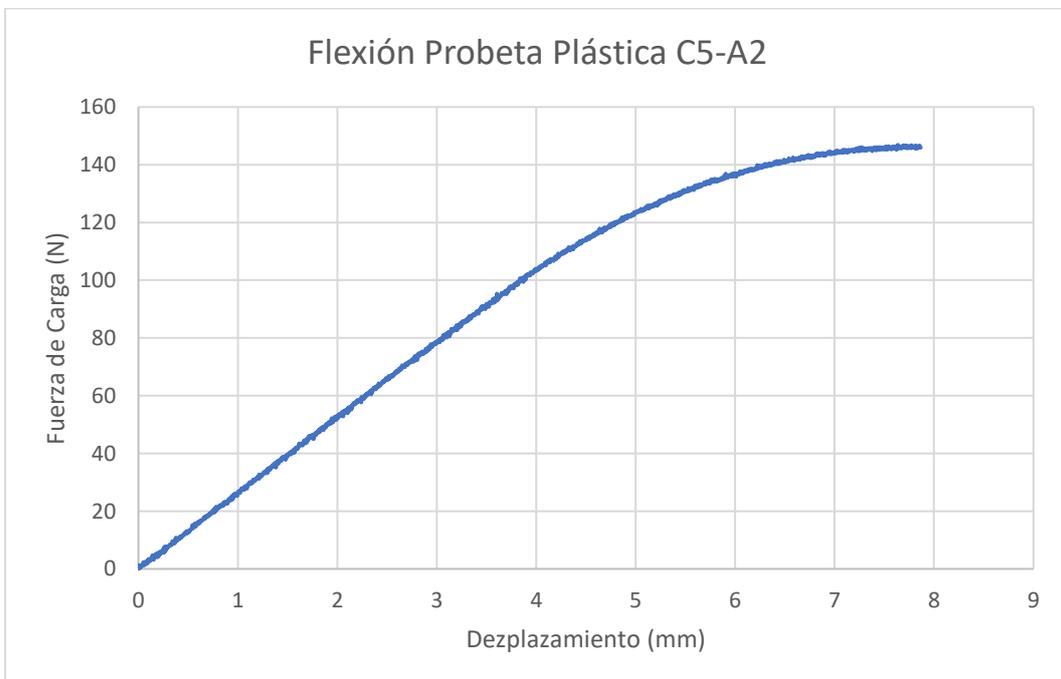
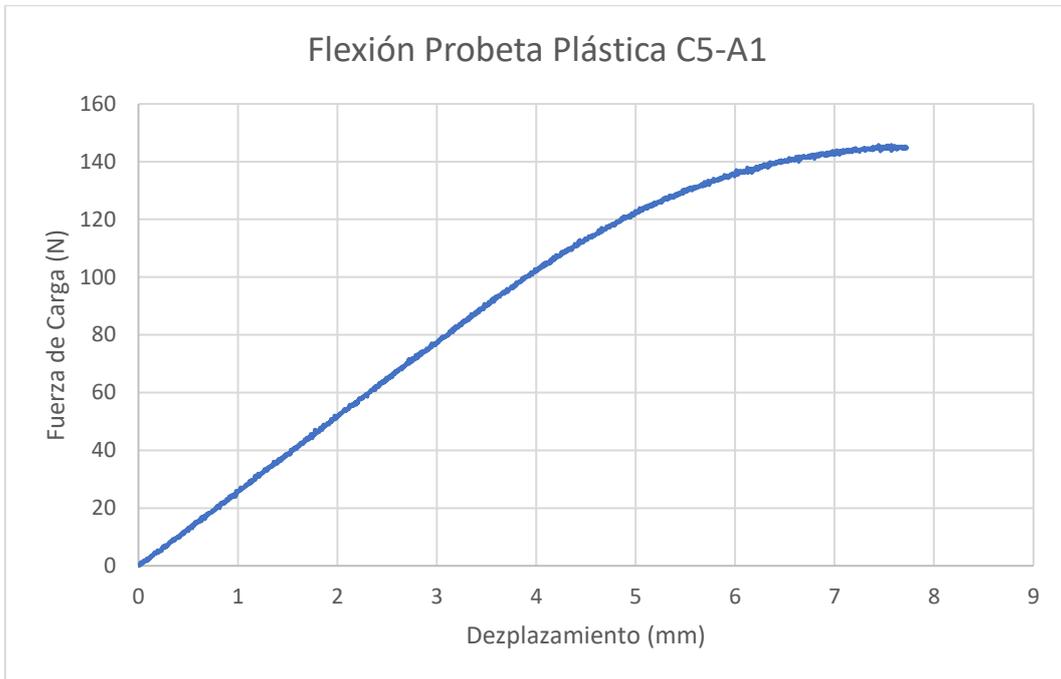


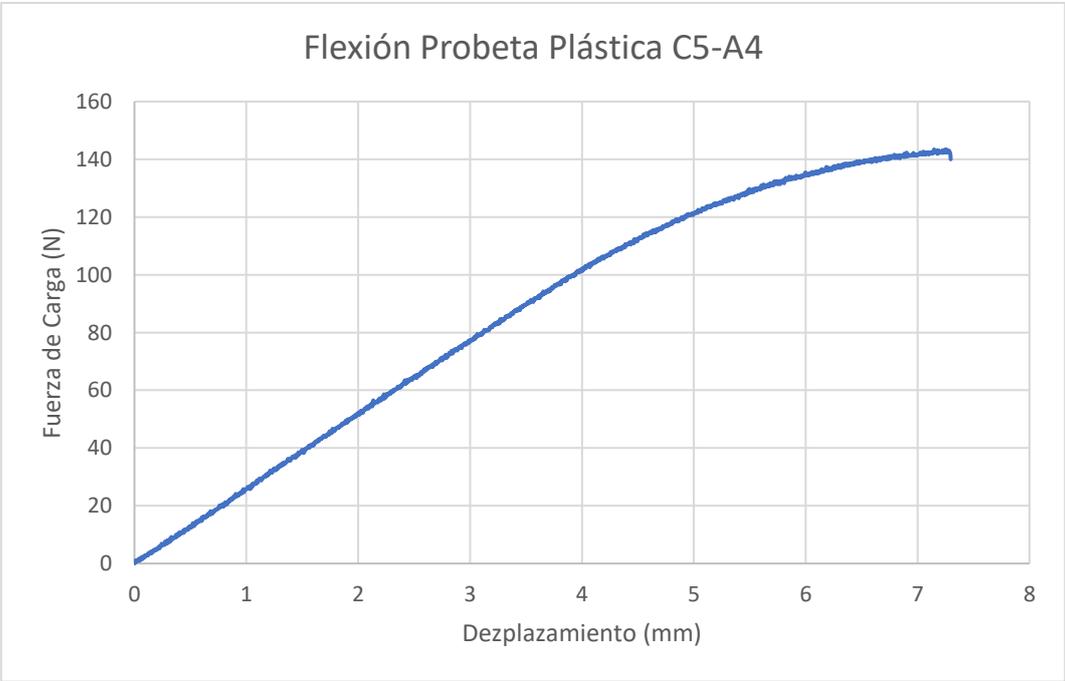
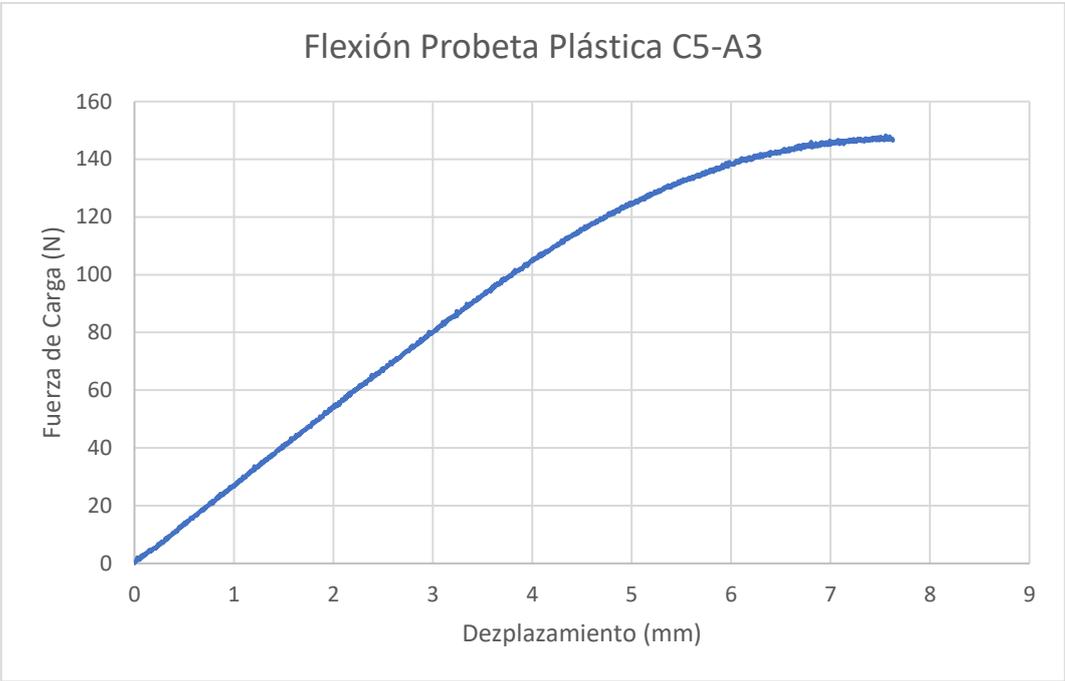


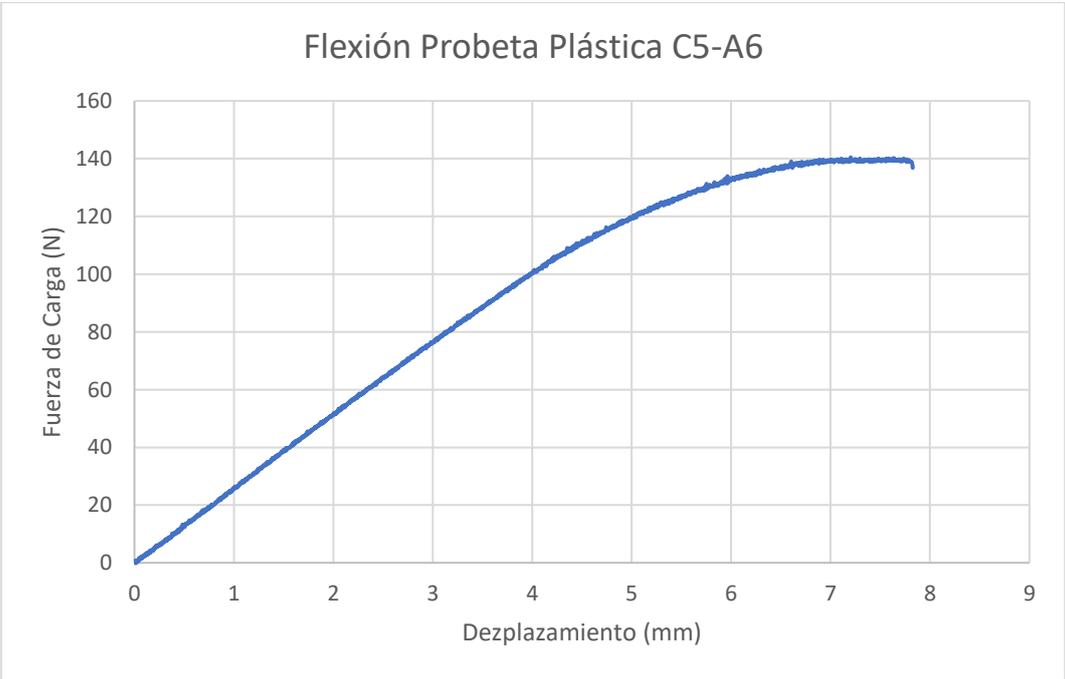
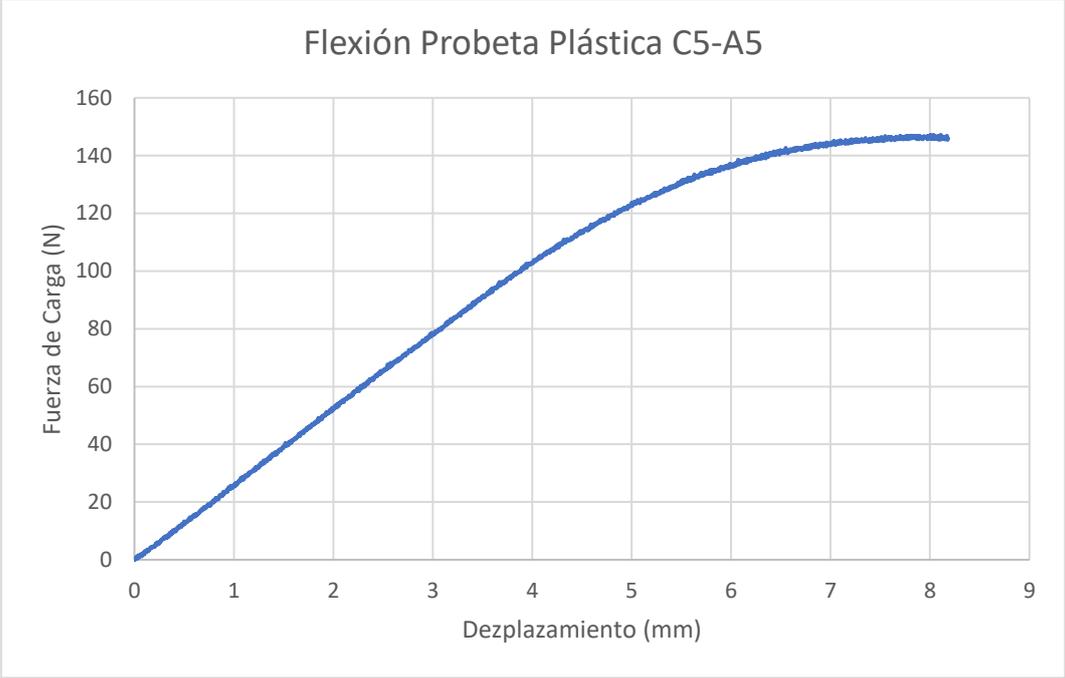




### 12.3 Ensayos con probetas de PLA







### **13. Anexo III: Manual de instalación de la célula de baja carga**

En este anexo se procede a adjuntar un manual de instalación para la célula de baja carga, es decir, la célula de 5 kN de capacidad referente en este proyecto.

Dicho manual se ha creado específicamente durante la realización del proyecto con la finalidad de facilitar el uso e instalación de la célula para futuros ensayos y estudios que se puedan dar.

Es necesario crear este documento debido a las notables diferencias de esta célula con respecto a la de alta carga. Ésta última lleva años usándose en el laboratorio por lo que todo el personal docente se encuentra familiarizado con ella además de que supone una instalación relativamente simple comparada con la nueva célula de carga. Aparte de eso, como nunca se había empleado una célula diferente, no era necesario la completa retirada o desinstalación de la célula anterior durante el uso normal de la máquina universal de ensayos, a excepción de propósitos de mantenimiento.

Una de las finalidades de este proyecto es animar a realizar ensayos con esta célula y al disponer de un documento simple y detallado de cómo hacer una correcta instalación de la nueva célula, se espera facilitar y motivar a emplearla. Por ese motivo, el documento se centrará todo lo posible en explicar únicamente la instalación mientras se apoya en documentos gráficos para una más fácil comprensión.

Por todo ello, se adjunta el manual siguiente:

# MANUAL DE INSTALACIÓN SIMPLE DE CÉLULA DE CARGA DE 5 KN



Para el laboratorio de Materiales de la Universidad de La Laguna

## Componentes para la instalación de la célula de carga



**Célula de Carga**



**Plato de sujeción**



**Adaptadores de accesorios**



**Cable de la célula**



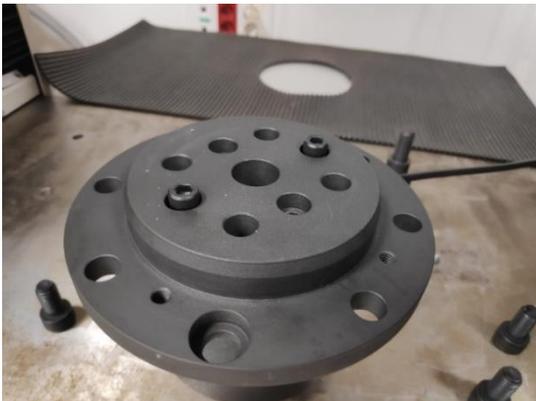
**Conjunto de llaves Allen**

## Pasos para la instalación

**Paso 1: Desatornillar los tornillos de la célula empleando las llaves Allen**



**Paso 2: Acoplar y atornillar el disco a la célula de la forma en la que se indica en las imágenes**



**Paso 3: Ajustar el tornillo central del plato y atornillar el plato de sujeción a la parte inferior del brazo de la máquina universal de ensayos**



**Paso 4: Retirar el cabezal protector**



**Paso 5: Colocar el adaptador de accesorios y ajustar el tornillo una vez colocado el accesorio**



**NO FORZAR EL ADAPTADOR AL APRETARLO DE MÁS, LA CÉLULA ES DELICADA Y PUEDE ROMPERSE CON FUERZA DE TORQUE EXCESIVA.**

**PaESFUERZO DE TORSIÓN MÁXIMO: 46 N**



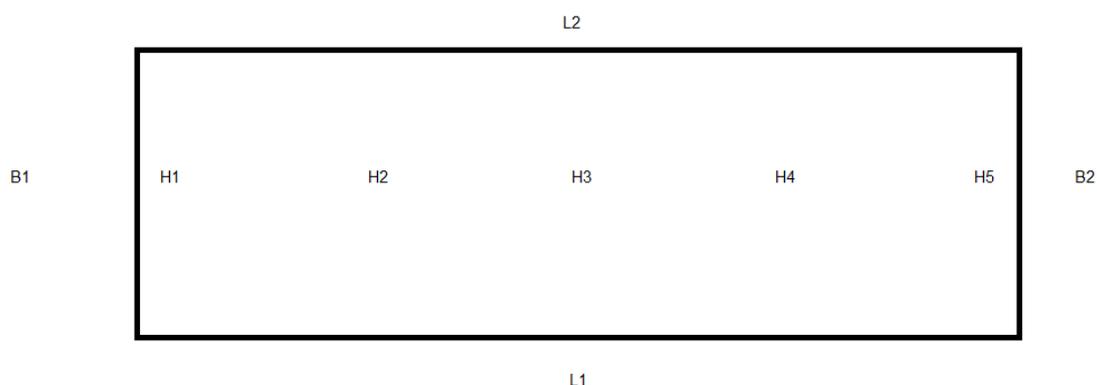
**NOTA IMPORTANTE: No se deben mezclar los cables de cada célula, el software del ordenador reconocerá que está conectada ÚNICAMENTE la célula a la que pertenece el cable**

## 14. Anexo IV: Mediciones de las probetas

### 17.1 Probetas de piedra natural

Estas probetas se han medido antes de realizar el ensayo con ellas, es decir, después de realizar todo el proceso de secado que se menciona en el apartado 3.2, donde se especifican todos los procesos de preparación por los que pasan las probetas. Uno de estos procesos es la toma de medidas que se han realizado siguiendo siempre las mismas pautas.

En la siguiente figura, se puede observar los puntos donde se han tomado las mediciones de los espesores:



Donde:

$H_n$  es la denominación para los puntos de medida de los espesores

$B_n$  es la denominación para las medidas de las anchuras de las probetas

$L_n$  es la denominación para las medidas de las longitudes de las probetas

A continuación, se presentan las gráficas de las medidas de la piedra natural de la célula de alta carga, donde todas las dimensiones de longitud están expresadas en milímetros:

	Peso (g)	B1	B2	H1	H2	H3	H4	H5	L1	L2
C50-P1	226,015	51	51	11,24	11,24	11,19	11,11	11,02	151	151
C50-P2	231,982	51	50	11,4	11,58	11,61	11,68	11,54	151	151
C50-P3	218,048	50	50	10,99	11,03	11,06	10,86	10,66	150	151
C50-P4	237,043	50	50	12,02	11,9	11,83	11,68	11,52	151	151
C50-P5	234,174	50	51	11,55	11,48	11,45	11,46	11,51	150	150
C50-P6	218,095	50	51	11,02	11,82	11,81	11,64	11,52	151	150
C50-P7	210,936	49	51	10,43	10,45	10,73	10,71	10,49	150	151
C50-P8	226,543	51	50	11,21	11,26	11,13	11,13	11,35	151	151
C50-P9	219,425	51	50	10,81	10,88	10,89	10,94	10,89	151	152
C50-P10	227,508	50	49	11,66	11,63	11,02	11,05	11,33	150	151
C50-P11	215,377	50	50	10,68	10,61	10,59	10,5	11,51	151	151
C50-P12	223,203	50	51	11,03	10,98	11,11	11,03	10,86	151	151
C50-P13	221,931	50	51	10,95	10,84	10,83	10,85	11,05	151	151

De la misma manera, se presentan las dimensiones de las probetas de piedra natural de la célula de baja carga con las longitudes también en milímetros:

	Peso (g)	B1	B2	H1	H2	H3	H4	H5	L1	L2
C5-P1	228,773	50	50	11,48	11,54	11,29	11,16	11,02	151	151
C5-P2	234,569	50	50	11,47	11,5	11,59	11,54	11,5	151	151
C5-P3	251,512	50	50	12,7	12,49	12,28	12,18	12,2	150	151
C5-P4	234,644	50	50	11,73	12,01	11,84	11,91	12,2	147	147
C5-P5	226,518	49	50	11,35	11,32	11,25	10,93	10,86	151	151
C5-P6	213,706	51	50	10,32	10,5	10,41	10,7	11,3	151	151
C5-P7	243,11	51	50	12,08	12,01	11,96	11,9	11,91	151	150
C5-P8	226,565	50	50	11,32	11,36	11,07	11,08	11,06	151	151
C5-P9	245,298	51	50	12,56	12,44	12,12	11,86	11,87	151	150
C5-P10	232,456	50	51	11,27	11,42	11,57	11,49	11,58	150	150
C5-P11	242,836	50	50	11,95	11,94	11,88	11,86	11,92	151	151
C5-P12	217,781	50	50	10,47	10,6	10,65	10,98	11,15	151	151
C5-P13	213,693	51	50	10,58	10,51	10,49	10,5	10,63	151	151

Al observar estas medidas es posible percatarse de que las mediciones de las longitudes y las anchuras poseen un orden de magnitud diferente. Esto es debido a que para medir los espesores se ha empleado un pie de rey mientras que para las otras longitudes se ha empleado una regla de medición ya que el tamaño del pie de rey no era suficiente para realizar todas las mediciones.

## 17.2 Probetas de cerámica

Al igual que con las probetas de la piedra natural, las mediciones de los materiales cerámicos se han realizado antes de realizar el ensayo con las probetas, ya realizado el proceso de secado que se menciona en el apartado 3.1 del documento.

De la misma manera, se presenta la misma figura indicativa para que a modo de aclaración, sea más sencillo comprender dónde se han realizado las mediciones:



Donde:

$H_n$  es la denominación para los puntos de medida de los espesores

$B_n$  es la denominación para las medidas de las anchuras de las probetas

$L_n$  es la denominación para las medidas de las longitudes de las probetas

Las mediciones obtenidas mediante este método para la célula de alta carga, con las longitudes expresadas en milímetros, son las siguientes:

	Peso (g)	B1	B2	H1	H2	H3	H4	H5	L1	L2
C50-C1	126,405	49	50	9,3	9,44	9,08	9,4	9,12	148	149
C50-C2	128,467	50	49	9,54	9,49	9,38	9,3	9,41	149	149
C50-C3	127,649	50	49	9,53	9,3	9,35	9,34	9,51	149	149
C50-C4	125,635	48	49	9,3	9,36	9,8	9,26	9,2	148	149
C50-C5	127,81	49	50	9,28	9,41	9,45	9,26	9,3	149	149
C50-C6	127,397	49	50	9,37	9,27	9,32	9,38	9,47	149	148
C50-C7	129,937	50	49	9,3	9,64	9,49	9,5	9,44	149	149
C50-C8	129,263	49	50	9,3	9,37	9,38	9,28	9,34	149	149

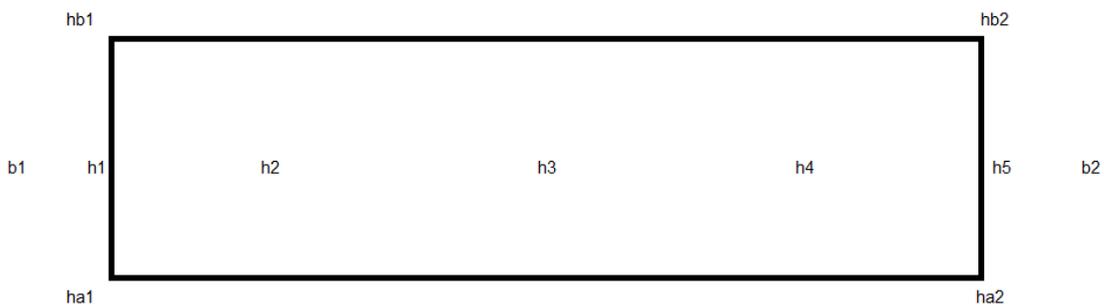
Mientras que las mediciones para la célula de baja carga son las siguientes:

	Peso (g)	B1	B2	H1	H2	H3	H4	H5	L1	L2
C5-C1	128,088	49,93	50,59	10,15	9,41	9,68	9,58	9,7	149	148
C5-C2	125,52	49,91	50,34	9,15	9,39	9,26	9,35	9,37	149	149
C5-C3	124,859	50,53	49,96	9,21	9,34	9,36	9,39	9,36	149	149
C5-C4	127,457	50,52	50,26	9,46	9,58	9,72	9,52	9,66	150	149
C5-C5	129,048	50,61	49,97	9,45	9,7	9,28	9,43	9,38	149	149
C5-C6	128,212	50,02	50,28	9,63	9,21	9,19	9,54	9,4	149	149
C5-C7	129,086	50,34	50,49	9,32	9,84	9,47	9,45	9,75	149	149
C5-C8	124,518	50,32	50,18	9,22	9,24	9,4	9,57	9,36	149	149

De la misma forma que con la piedra natural, se puede observar una discrepancia en el orden de magnitud de las medidas de longitud debido a la utilización de dos instrumentos de medida diferentes.

### 17.3 Probetas de plástico (PLA)

Las probetas de polímero plástico han sido medidas antes de empezar los ensayos con ellas. Para una mayor aclaración geométrica de los puntos de toma de medidas, se emplea una figura indicativa de la misma manera que en los apartados anteriores.



Donde:

$h_n$  es la denominación para los puntos de medida de los espesores

$b_n$  es la denominación para las medidas de las anchuras de las probetas

$hb_n$  es la denominación para las medidas de las anchuras en las esquinas

Mientras que, para la medida longitudinal de la probeta, a diferencia de los dos materiales anteriores, solamente se ha empleado una única medida en el eje central de la probeta que se denomina con la letra L.

Se presentan así, los datos de las probetas de la célula de carga de 50 kN con las medidas de longitud expresadas en milímetros:

	C50-A1	C50-A2	C50-A3	C50-A4	C50-A5	C50-A6
Peso (g)	3,865	3,854	3,865	3,858	3,863	3,848
b1	10,40	10,33	10,26	10,42	10,29	10,37
b2	10,24	10,68	10,87	11,09	10,75	10,42
h1	4,08	4,03	4,08	4,00	4,00	3,98
h2	4,17	4,06	4,11	4,04	4,05	3,95
h3	4,13	4,01	4,10	3,99	4,03	4,00
h4	4,17	4,01	4,08	4,00	4,05	4,00
h5	4,10	4,03	4,06	4,05	4,05	3,94
ha1	4,05	4,12	4,16	4,01	4,10	4,00
ha2	4,10	4,03	4,17	4,11	4,06	4,00
hb1	4,16	4,17	4,14	4,09	4,04	4,05
hb2	4,13	4,13	4,16	4,11	4,00	4,06
L	78,95	79,84	79,88	79,81	78,89	79,94

A continuación, se exponen los valores de las mediciones de las probetas que se han realizado para los ensayos con la célula de carga de 5 kN, con las medidas de longitud también en milímetros:

	C5-A1	C5-A2	C5-A3	C5-A4	C5-A5	C5-A6
Peso (g)	3,883	3,884	3,901	3,881	3,891	3,873
b1	10,42	11,30	11,93	11,44	10,43	10,91
b2	11,14	10,41	10,45	10,41	10,99	10,47
h1	4,01	4,21	4,18	4,18	4,03	3,93
h2	4,00	3,96	4,00	4,00	3,98	3,97
h3	3,94	3,97	4,01	3,95	4,07	3,94
h4	3,92	4,01	4,05	3,98	4,02	4,02
h5	3,97	4,18	4,22	4,07	4,01	3,99
ha1	4,18	4,19	4,08	3,95	4,16	4,09
ha2	4,17	4,00	4,16	4,09	4,16	4,08
hb1	4,02	4,17	4,11	4,08	4,13	4,18
hb2	4,17	4,17	4,07	4,15	4,02	4,11
L	79,95	79,90	79,85	79,97	79,93	79,91

## 15. Anexo V: Secado de las probetas de piedra natural

En este anexo se presentan los valores de las medidas de la masa de las probetas durante el proceso de secado.

Las medidas en gramos para la tanda de probetas de ensayo para la célula de alta carga son las siguientes:

	DIA 0	DIA 1	DIA 2	DIA 5	DIA 6	DIA 7
C50-P1	231,854	228,166	227,051	226,175	226,071	226,015
C50-P2	238,251	234,29	233,101	232,151	232,04	231,982
C50-P3	223,909	220,186	219,118	218,21	218,103	218,048
C50-P4	243,688	239,79	238,54	237,269	237,119	237,043
C50-P5	240,285	236,511	235,409	234,372	234,246	234,174
C50-P6	224,086	220,316	219,246	218,29	218,17	218,095
C50-P7	216,524	212,934	211,803	211,04	210,979	210,936
C50-P8	231,737	228,053	227,178	226,64	226,578	226,543
C50-P9	224,965	221,336	220,343	219,578	219,484	219,425
C50-P10	233,522	229,683	228,644	227,674	227,576	227,508
C50-P11	219,848	216,285	215,744	215,426	215,38	215,377
C50-P12	228,995	225,232	224,214	223,356	223,266	223,203
C50-P13	227,576	223,951	222,904	222,09	221,99	221,931

Los valores numéricos marcados en verde, indican que cumplen la condición expuesta en el apartado 3.2 para el secado de la probeta, es decir, que la diferencia del peso de ese día respecto a la media anterior, es menor de un 0,1 %.

Como se puede apreciar, al llegar el día 6, todas las probetas cumplían los requisitos para su ensayo, pero se decidió esperar un día más para el secado para preparar y reservar el laboratorio para los ensayos de flexión.

Las medidas de secado en gramos para realizar los ensayos en la célula de baja carga son los siguientes:

	DIA 0	DIA 4	DIA 6	DIA 7	DIA 8
C5-P1	234,661	229,161	228,881	228,805	228,773
C5-P2	240,374	234,891	234,65	234,545	234,569
C5-P3	257,964	252,032	251,675	251,54	251,512
C5-P4	239,431	234,795	234,706	234,641	234,644
C5-P5	232,715	226,867	226,673	226,566	226,518
C5-P6	219,207	213,934	213,806	213,718	213,706
C5-P7	248,336	243,339	243,186	243,128	243,11
C5-P8	231,475	226,827	226,688	226,614	226,565
C5-P9	251,634	245,808	245,449	245,376	245,298
C5-P10	238,713	232,962	232,581	232,497	232,456
C5-P11	247,413	243,018	242,911	242,855	242,836
C5-P12	223,263	218,085	217,857	217,784	217,781
C5-P13	218,308	213,916	213,785	213,718	213,693

Esta tanda tardó algo más secarse completamente, pero se observa que al sexto día la mayoría de las probetas estaban listas para su ensayo, pero no todas. A pesar de que el día 7 las probetas eran aptas para su ensayo, se decidió esperar un día más por motivos de disponibilidad del laboratorio.