

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Puesta a Punto de Técnica de Fabricación de  
Probetas de Tapia. Ensayos de Tracción Indirecta

Autor: José Luis Bocanegra Cerrada

Tutor: Mario Solís Muñiz

**Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría  
de Estructuras**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2019





Proyecto Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

# **Puesta a Punto de Técnica de Fabricación de Probetas de Tapia. Ensayos de Tracción Indirecta**

Autor:

José Luis Bocanegra Cerrada

Tutor:

Mario Solís Muñiz

Profesor Contratado Doctor

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Grado: Puesta a Punto de Técnica de Fabricación de Probetas de Tapia. Ensayos de Tracción Indirecta

Autor: José Luis Bocanegra Cerrada

Tutor: Mario Solís Muñiz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

La campaña experimental recogida en este documento no habría sido posible sin el apoyo de todas las personas que han participado en este proyecto y que merecen una mención.

Me gustaría agradecer a mi tutor Mario Solís Muñoz la gran implicación que ha mostrado con este proyecto y su apoyo y ayuda durante el desarrollo del mismo.

A mi compañera de TFG Isabel Rodríguez Jiménez me gustaría agradecerle la profesionalidad y la dedicación en el trabajo realizado además de la excelente comunicación en el reparto de tareas.

Agradecer también la colaboración de Arturo Jiménez Viera, miembro de la asociación Taph Taph, por sus consejos y su experiencia.

Por último, agradezco el apoyo de los técnicos de laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura y de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, en especial a Emilio Javier Gómez Álvarez por su experiencia a la hora de resolver problemas y su atención en todo momento.

*José Luis Bocanegra Cerrada*

*Sevilla, 2019*

---

# Resumen

---

Este trabajo fin de grado se centra en la caracterización mecánica de probetas de tapia, una técnica de construcción que utiliza capas de tierra cruda prensada. La tierra cruda es un material de construcción muy extendido por todo el mundo pero del que se tiene poco conocimiento, el objetivo de este trabajo es realizar una caracterización de dicho material mediante la fabricación y ensayo de probetas de tapia.

Se recoge la campaña experimental llevada a cabo conjuntamente con Isabel Rodríguez Jiménez, que en su trabajo fin de grado recoge los resultados de los ensayos a compresión simple [1]. Por otro lado, los datos que se recogen en este trabajo corresponden al comportamiento a tracción indirecta y la energía de fractura del material.

Este documento recoge la puesta a punto del proceso de fabricación de probetas de tapia para su ensayo posterior a tracción indirecta y flexión a tres puntos. Recoge también el desarrollo de un método de medición de la humedad de la tierra in-situ para la aplicación en obra.

Por último se muestran los resultados de los ensayos realizados y una comparativa de la resistencia obtenida frente a varios parámetros que determinan las características de cada probeta.



# Abstract

---

This end-of-grade project focuses on the mechanical characterization of rammed earth test specimens, a construction technique that uses layers of raw rammed earth. The raw earth is a construction material widely spread around the world but of which little is known, the objective of this work is to perform a characterization of said material through the manufacture and testing of rammed earth test specimens.

The experimental campaign carried out together with Isabel Rodríguez Jiménez, who in her end-of-grade project shows the results of the simple compression tests [1]. On the other hand, the data collected in this document correspond to the indirect tensile behavior and fracture energy of the material.

This document includes the development of the manufacturing process of test specimens for its subsequent test on indirect tensile and three-point bending. It also includes the development of an earth moisture measurement method for application on site.

Finally, the document shows the results of the tests carried out and a comparison of the resistance obtained against several parameters that determine the characteristics of each test piece.

# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>viii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>x</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Tierra cruda</i>	1
1.1.1 Técnicas de construcción con tierra cruda	2
<b>2 Estado del arte</b>	<b>4</b>
2.1 <i>Actualidad</i>	4
2.2 <i>Relevancia y aplicaciones de la técnica de tapia</i>	5
<b>3 Objetivos del proyecto</b>	<b>7</b>
3.1 <i>Construcción punto de lectura en Valverde de Burguillos</i>	7
3.2 <i>Campaña experimental</i>	8
3.3 <i>Caracterización del material</i>	9
<b>4 Datos previos del material</b>	<b>10</b>
4.1 <i>Ensayo Proctor</i>	11
4.1.1 Descripción del ensayo	11
4.1.2 Resultados del ensayo Proctor	12
4.2 <i>Granulometría del material</i>	13
4.2.1 Estudio de granulometría de la mezcla final	14
<b>5 Medida de humedad mediante TDR</b>	<b>16</b>
5.1 <i>Descripción técnica de medida</i>	16
5.1.1 Fundamento teórico de la técnica	16
5.1.2 Descripción del equipo de medida	17
5.2 <i>Calibración del equipo de medida</i>	18
5.2.1 Procedimiento	18
5.2.2 Resultado	20
5.2.3 Aplicaciones	23
<b>6 Fabricación de las probetas</b>	<b>24</b>
6.1 <i>Consideraciones previas</i>	24
6.1.1 Dimensiones	24
6.1.2 Dirección de compactación	25
6.1.3 Densidad objetivo, número de tongadas y método de compactación	26
6.2 <i>Descripción y fabricación de los moldes y pisones</i>	27
6.2.1 Descripción geométrica	29
6.2.2 Descripción de uniones y refuerzos	30
6.3 <i>Procedimiento de fabricación de las probetas</i>	31
6.3.1 Medida de humedad previa y adición de agua	31

6.3.2	Mezclado	32
6.3.3	Medida de humedad con TDR y medida de humedad tras secado en horno	32
6.3.4	Compactación estática con actuador hidráulico con densidad objetivo igual a la de próctor	34
6.3.5	Medida de energía de compactación	36
6.3.6	Resultados de la compactación	37
6.4	<i>Curado de las probetas</i>	43
6.4.1	Histórico de temperatura y humedad	45
6.5	<i>Cálculo de la densidad de las probetas y geometría final</i>	45
6.6	<i>Medida de ultrasonidos de las probetas</i>	47
<b>7</b>	<b>Ensayos</b>	<b>50</b>
7.1	<i>Ensayo para la determinación de la resistencia a tracción indirecta, <math>f_{ct}</math></i>	50
7.1.1	Realización de los ensayos	52
7.1.2	Relación, Fuerza aplicada vs Tensión de tracción	53
7.1.3	Resultados del ensayo	53
7.2	<i>Ensayo para la determinación de la energía de fractura por unidad de área, <math>G_f</math></i>	55
7.2.1	Realización de los ensayos	56
7.2.2	Relación, Fuerza aplicada vs Energía de fractura por unidad de área	57
7.2.3	Resultados de los ensayos	59
7.3	<i>Ensayos para la determinación de la resistencia a compresión simple, <math>f_{ck}</math></i>	61
7.4	<i>Validez de la normativa</i>	62
7.5	<i>Correlación de Resistencia a tracción y energía de fractura con otros parámetros</i>	63
7.5.1	Resistencia Vs energía de compactación por unidad de volumen	63
7.5.2	Resistencia Vs humedad inicial	65
7.5.3	Resistencia Vs humedad final	67
7.5.4	Resistencia Vs densidad	69
7.5.5	Resistencia Vs velocidad de ultrasonidos en la dirección de la tracción	71
7.5.6	Resistencia Vs velocidad de ultrasonidos en la dirección perpendicular a la tracción	72
7.5.7	Resistencia Vs edad de la probeta	74
<b>8</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>76</b>
8.1	<i>Medición</i>	76
8.2	<i>Fabricación</i>	76
8.2.1	Gradiente de las propiedades de las probetas	76
8.2.2	Energía de compactación estática Vs dinámica	77
8.2.3	Retracción de las probetas	77
8.2.4	Control en carga	77
8.2.5	Desgaste de los moldes	78
8.3	<i>Resultados</i>	78
8.3.1	Comparación resistencia a tracción indirecta con resistencia a compresión	78
8.3.2	Comparación con la bibliografía	78
8.4	<i>Líneas de investigación futura</i>	81
	<b>Referencias</b>	<b>83</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Programación de la campaña experimental	8
Tabla 2: Especificaciones Fieldscout TDR 150	17
Tabla 3: Humedad medida mediante secado en horno, [1].	33
Tabla 4: Medida de humedad mediante la calibración de FieldScout TDR-150, [1].	34
Tabla 5: Datos tras compactación de probetas prismáticas 200x100x100mm	38
Tabla 6: Datos tras compactación de probetas prismáticas 450x100x100mm	40
Tabla 7: Datos tras compactación de probetas cilíndricas	41
Tabla 8: Humedad final y edad de probetas	44
Tabla 9: Densidad seca de las probetas	46
Tabla 10: Velocidad de propagación de ultrasonidos en probetas prismáticas, [1]	48
Tabla 11: Velocidad de propagación de ultrasonidos en probetas cilíndricas, [1]	48
Tabla 12: Cálculo $f_{ct}$ en la dirección perpendicular a la compactación	53
Tabla 13: Cálculo $f_{ct}$ en la dirección de la compactación	54
Tabla 14: Datos geométricos, ensayo de flexión a tres puntos	60
Tabla 15: Energía de fractura, ensayo de flexión a tres puntos	60
Tabla 16: Resistencia a compresión $f_{ck}$ , probetas cilíndricas	62
Tabla 17: Resistencia a compresión $f_{ck}$ , probetas prismáticas	62
Tabla 18: Granulometría, <i>Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento</i> [2]	79

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Ilustración 1: Técnica de construcción con tapial, [3]	3
Ilustración 2: Localización geográfica de la arquitectura con tierra, [5]	4
Ilustración 3: Construcción con tapial en la actualidad, [1]	5
Ilustración 4: Alhambra de Granada, España	5
Ilustración 5: Vista en detalle del punto de lectura, Valverde de Burguillos	7
Ilustración 6: Zahorra artificial ZA-25, izquierda	10
Ilustración 7: Arena gravosa SG, antes de tamizar a 2 mm, derecha	10
Ilustración 8: Dosificaciones, Isabel Rodríguez Jiménez [1]	11
Ilustración 9: Ensayo Próctor Dosificación C (9Tierra/2Arena)	12
Ilustración 10: Curva granulométrica de la dosificación C, Isabel Rodríguez Jiménez [1]	14
Ilustración 11: Curva granulométrica final, Isabel Rodríguez Jiménez [1]	14
Ilustración 12: Fieldscout TDR 150	16
Ilustración 13: Curva calibración 1, Period	20
Ilustración 14: Curva de calibración 2, Period	21
Ilustración 15: Curva de calibración 3, Period	21
Ilustración 16: Curva de calibración 1, Electric Conductivity	22
Ilustración 17: Cálculo de la humedad	23
Ilustración 18: Proceso de fabricación de las probetas, [1].	24
Ilustración 19: Dimensiones de fabricación 100x100x200 mm, cotas en mm [1]	24
Ilustración 20: Dimensiones de fabricación de probetas prismáticas 100x100x450 mm, cotas en mm [1]	24
Ilustración 21: Dimensiones de fabricación probetas cilíndricas, cotas en mm [1]	25
Ilustración 22: Compactación de la tierra mediante la técnica de tapia	25
Ilustración 23: Molde para probetas de 100x200x100 mm	27
Ilustración 24: Molde para probetas de 100x450x100mm	28
Ilustración 25: Perfil HEB 100 utilizado para los pisones, cotas en milímetros	28
Ilustración 26: Localización de la grieta	30
Ilustración 27: Refuerzos con listones de madera	31
Ilustración 28: Molde final, con refuerzos metálicos desmontables	31
Ilustración 29: Máquina universal de ensayos Servosis	34
Ilustración 30: Pórtico de carga Servosis	35
Ilustración 31: Ejemplo de datos devueltos por el software trazador	36
Ilustración 32: Ejemplo de compactación de la probeta prismática 1	36
Ilustración 33: Curvas de compactación de probetas prismáticas 200x100x100mm	39
Ilustración 34: Energía de compactación por unidad de volumen de probetas prismáticas 100x100x200 mm	39
Ilustración 35: Curvas de compactación de probetas prismáticas 450x100x100mm	40
Ilustración 36: Energía de compactación, probetas de flexión	41

Ilustración 37: Curvas de compactación de probetas cilíndricas	42
Ilustración 38: Energía de compactación, probetas cilíndricas	42
Ilustración 39: Probetas prismáticas 100x100x200 mm y probetas cilíndricas (izquierda) y probetas prismáticas 100x450x100 mm (derecha)	43
Ilustración 40: Histórico de humedad y temperatura de la cámara de curado	45
Ilustración 41: Densidad seca de las probetas	47
Ilustración 42: CSI Concrete Tester CCT-4, [1]	47
Ilustración 43: Gradiente de velocidades de ultrasonidos, de mayor a menor según flecha, [1]	49
Ilustración 44: Estado tensional durante el ensayo brasileño [15]	50
Ilustración 45: Ensayo brasileño. Dirección de tracción perpendicular a la dirección de compactación	51
Ilustración 46: Ensayo brasileño. Dirección de tracción en la dirección de la compactación	51
Ilustración 47: Estado tensional, <i>Modelización numérica de la fractura en ensayos brasileños de materiales cerámicos a alta velocidad de deformación</i> [15]	52
Ilustración 48: Estado de la fisuración, <i>Modelización numérica de la fractura en ensayos brasileños de materiales cerámicos a alta velocidad de deformación</i> [15]	52
Ilustración 49: Ensayo brasileño, tracción en la dirección de compactación	52
Ilustración 50: Resistencia a tracción en la dirección perpendicular a la compactación, probetas prismáticas	53
Ilustración 51: Resistencia a tracción en la dirección perpendicular a la compactación, probetas cilíndricas	54
Ilustración 52: Resistencia a tracción en la dirección de la compactación, probetas prismáticas	55
Ilustración 53: Enyaso de flexión a tres puntos	56
Ilustración 54: Geometría de probetas para el ensayo de flexión a tres puntos, [14]	57
Ilustración 55: Condiciones de contorno para el ensayo de flexión a tres puntos, [14]	57
Ilustración 56: Dimensiones de referencia RILEM 50-FMC Draft Recommendation, [14]	57
Ilustración 57: Cálculo de $W_0$	58
Ilustración 58: Fuerza Vs medición del sensor LVDT (Linear Variable Differential Transformer)	59
Ilustración 59: Fuerza Vs medición del sensor CMOD (Crack Mouth Opening Displacement)	59
Ilustración 60: Energía de fractura por unidad de área $G_f$	61
Ilustración 61: Resistencia a compresión $f_{ck}$ , probetas cilíndricas	61
Ilustración 62: Resistencia a compresión $f_{ck}$ , probetas prismáticas	62
Ilustración 63: Resistencia a tracción Vs Energía de compactación (1)	63
Ilustración 64: Resistencia a tracción Vs Energía de compactación (2)	63
Ilustración 65: Resistencia a tracción Vs Energía de compactación (3)	64
Ilustración 66: Energía de fractura por unidad de área Vs Energía de compactación por unidad de volumen	64
Ilustración 67: Resistencia a tracción Vs humedad inicial (1)	65
Ilustración 68: Resistencia a tracción Vs humedad inicial (2)	65
Ilustración 69: Resistencia a tracción Vs humedad inicial (3)	66
Ilustración 70: Energía de fractura por unidad de área Vs humedad inicial	66
Ilustración 71: Resistencia a tracción Vs humedad final (1)	67
Ilustración 72: Resistencia a tracción Vs humedad final (2)	67

Ilustración 73: Resistencia a tracción Vs humedad final (3)	68
Ilustración 74: Energía de fractura por unidad de área Vs humedad final	68
Ilustración 75: Resistencia a tracción Vs densidad seca (1)	69
Ilustración 76: Resistencia a tracción Vs densidad seca (2)	69
Ilustración 77: Resistencia a tracción Vs densidad seca (3)	70
Ilustración 78: Energía de fractura por unidad de área Vs densidad seca	70
Ilustración 79: Resistencia a tracción Vs velocidad de propagación de ultrasonidos, dirección de la tracción (1)	71
Ilustración 80: Resistencia a tracción Vs velocidad de propagación de ultrasonidos, dirección de la tracción (2)	71
Ilustración 81: Resistencia a tracción Vs velocidad de propagación de ultrasonidos, dirección de la tracción (3)	72
Ilustración 82: Resistencia a tracción Vs velocidad de propagación de ultrasonidos, dirección normal a la tracción (1)	72
Ilustración 83: Resistencia a tracción Vs velocidad de propagación de ultrasonidos, dirección normal a la tracción (2)	73
Ilustración 84: Resistencia a tracción Vs velocidad de propagación de ultrasonidos, dirección normal a la tracción (3)	73
Ilustración 85: Resistencia a tracción Vs edad de la probeta (1)	74
Ilustración 86: Resistencia a tracción Vs edad de la probeta (2)	74
Ilustración 87: Resistencia a tracción Vs edad de la probeta (3)	75
Ilustración 88: Energía de fractura por unidad de área Vs edad de la probeta	75
Ilustración 89: Gradiente de las propiedades de las probetas	77
Ilustración 90: Ensayo de compresión simple, <i>Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento</i> [2]	79
Ilustración 91: Ensayo proctor, <i>Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento</i> [2]	80
Ilustración 92: Resistencia a compresión simple, <i>Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento</i> [2]	80





# 1 INTRODUCCIÓN

---

A partir de las últimas décadas del Siglo XX se ha experimentado un crecimiento en el interés por los métodos de construcción con tierra cruda por diversos motivos, especialmente por su bajo impacto ambiental. Aunque en las sociedades desarrolladas la arquitectura tradicional con tierra cruda ha sido relegada a un segundo plano para dejar paso a la construcción con hormigón y acero, esta arquitectura está presente en una gran parte del mundo y sigue siendo el principal método de construcción utilizado en poblaciones con recursos económicos precarios.

La gran disponibilidad de la materia prima, el bajo coste, su fácil manipulación y la posibilidad de la autoconstrucción hacen de la construcción con tierra cruda uno de los métodos más extendidos en países en vías de desarrollo. Sin embargo, la baja resistencia a esfuerzos tangenciales y a tracción de este tipo de construcciones hace que puedan llegar al colapso en presencia de actividad sísmica. Como respuesta a este problema se han realizado varios estudios para determinar el comportamiento mecánico de este tipo de materiales.

Por otro lado, la creciente concienciación social por el cuidado del medio ambiente y la búsqueda de métodos de producción sostenibles ha llevado a una parte del sector académico a profundizar en el desarrollo de la construcción con tierra cruda.

La construcción con tierra cruda frente a la construcción con tierra cocida en forma de ladrillos ofrece ventajas en cuanto a la huella ambiental producida. Entre esas ventajas está el ahorro energético, no sólo durante la construcción puesto que en el proceso de construcción con tierra cruda sólo hay gasto de transporte que se reduce significativamente en caso de que la explotación de la tierra proceda de un lugar cercano a la obra, si no que además se presenta un gran ahorro energético en la climatización. Este ahorro energético se traduce en una menor emisión de CO<sub>2</sub> durante su ciclo de vida.

Dentro de este marco de investigación se encuentra esta campaña experimental que tiene como objetivo caracterizar un material que presenta numerosas ventajas y que está presente en gran parte de las construcciones a nivel mundial.

En esta introducción se recoge un resumen de las características de la tierra cruda como material de construcción y las técnicas utilizadas, entre ellas la técnica de tapial que es objeto de este estudio.

## 1.1 Tierra cruda

La tierra cruda como material de construcción presenta en la actualidad gran importancia en muchas regiones del planeta. Entre las características más destacables se encuentra un buen comportamiento a compresión, suficiente para la construcción de viviendas de una o dos plantas. Presentan también gran fragilidad y poca resistencia a esfuerzos tangenciales y a tracción.

Una de las características más destacables de este material es su elevada capacidad de aislamiento térmico y acústico, unido a una gran inercia térmica que hace que en zonas del planeta con climas templados sea innecesario el uso de climatización artificial.

Una de las dificultades para la caracterización de las propiedades de este material de construcción es su heterogeneidad, la composición de la tierra depende del yacimiento de procedencia y por tanto sus propiedades varían.

La tierra cruda utilizada para la construcción se compone de partículas que provienen de la desintegración de la roca madre de tamaño variable. Aunque las partículas de mediano tamaño como la grava y la arena pueden considerarse inertes, las partículas minerales de un tamaño inferior a 0,002 mm categorizadas como arcillas se consideran elementos activos.

Una de las propiedades destacadas de las arcillas es la cohesión que se genera entre sus partículas. Esta

cohesión entre partículas es la que hace posible la construcción con este material.

La cohesión es el resultado de la atracción y la repulsión entre las partículas, esta interacción entre partículas es de intensidad variable y como si de cargas se tratara, depende de la distancia entre ellas o distancia interlaminar. Con contenidos bajos de humedad, las arcillas conforman un sólido coherente debido a las fuerzas de atracción entre las láminas de las partículas que lo componen. Sin embargo, ante la inclusión de agua en el espacio interlaminar la separación entre láminas aumenta y por tanto las fuerzas de cohesión disminuyen [2].

Por esta razón, las construcciones con tierra cruda tienden a sufrir erosión y disociación para niveles altos de humedad. Las construcciones con tierra a menudo requieren un recubrimiento para evitar dicha erosión y absorción de humedad, también se realiza mantenimiento recubriendo los muros con nuevo mortero para reemplazar el material perdido.

### **1.1.1 Técnicas de construcción con tierra cruda**

Existen numerosas técnicas de construcción con tierra cruda, de las cuales tienen relevancia para este proyecto el adobe, la técnica del tapial y la técnica de Bloques de Tierra Comprimida (BTC).

Las construcciones con tierra cruda presentan tendencia a absorber la humedad atmosférica, hecho que reduce sus propiedades mecánicas. Además presentan tendencia a absorber por capilaridad el agua acumulada en el suelo por lo que es recomendable colocar un sobrecimiento antes de levantar el muro.

Este sobrecimiento aísla al muro de la humedad del suelo y para su construcción de forma tradicional se utilizan piedras cohesionadas con mortero.

#### **1.1.1.1 Adobe**

Esta técnica de construcción consiste en la elaboración de bloques de una mezcla de tierra húmeda de alta plasticidad, su posterior secado sin cocción y por último su utilización en obra utilizando mortero elaborado con la misma mezcla para la unión entre los diferentes bloques. La composición heterogénea, debido a las uniones entre bloques, de las construcciones de adobe dificulta la predicción de su comportamiento.

La mezcla se fabrica con arena, arcilla y agua. Como elemento adicional se le suelen añadir fibras vegetales como paja para evitar que se agrieten los bloques durante el secado debido a la retracción y con el objetivo de añadir un poco de resistencia a tracción al material.

Las dimensiones aproximadas suelen ser de 100x240x340 mm para facilitar el manejo por parte del albañil [1].

#### **1.1.1.2 BTC**

Los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) se realizan de forma similar a los bloques de adobe con la diferencia de que los BTC se someten a prensado, lo cual proporciona mejores propiedades mecánicas y de regulación de la humedad. La mezcla utilizada carece de fibras vegetales y contiene un menor grado de humedad que la empleada en el adobe, además suelen emplearse estabilizadores como cal, yeso o cemento.

Para la fabricación de un BTC se necesita aproximadamente el 1% de la energía necesaria para producir un ladrillo de arcilla cocida [3].

#### **1.1.1.3 Tapial**

La técnica del tapial o tapia consiste en la construcción de un muro monolítico con tierra húmeda apisonada dentro de un encofrado. El muro se alza desde el suelo apilando capas de tierra o tongadas de 10 a 15 cm, una vez se apisona la tierra se retira el encofrado y se coloca en la siguiente sección del muro para repetir el proceso.

Como se puede observar en la imagen siguiente, la unión entre secciones diferentes se suele realizar en diagonal para mejorar la superficie de contacto entre capas.

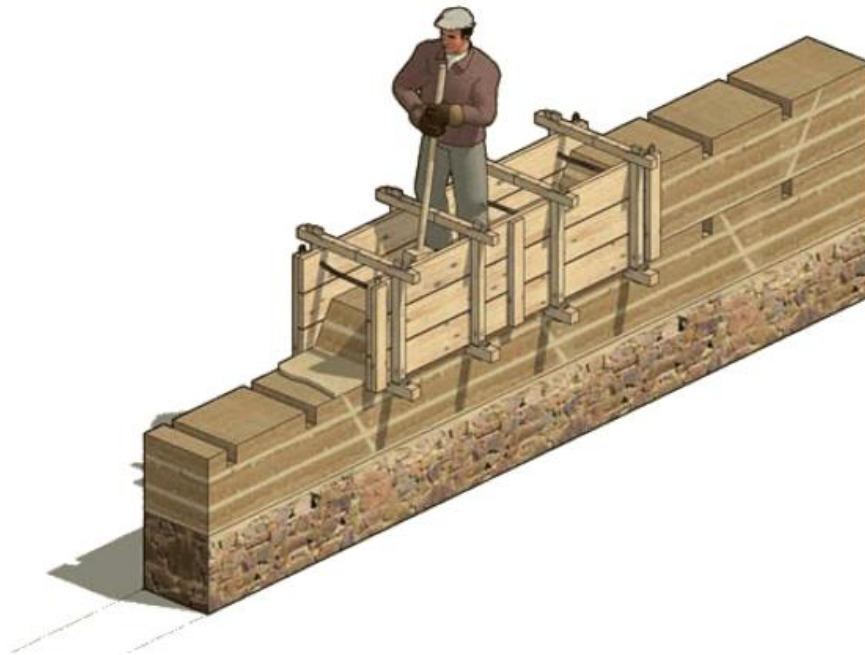


Ilustración 1: Técnica de construcción con tapia, [3]

El encofrado tradicional consta de dos paredes de madera unidas por varios travesaños que evitan su apertura ante la presión aplicada al apisonar la tierra. Para la compactación de la tierra se utilizan tradicionalmente pisones manuales de madera aunque en la actualidad se ha incluido el uso de vibradores de tierra y pisones neumáticos.

Debido a una menor humedad durante la fabricación, en los muros de tapia se observa una menor retracción que en los bloques de adobe.

Los muros de tapia se suelen levantar sobre un sobrecimiento de piedra para aislarlos de la humedad del suelo.

## 2 ESTADO DEL ARTE

La construcción con tapia en los últimos años ha pasado de ser un arte tradicional en desuso a despertar el interés de un parte del sector de la construcción y de un sector académico interesado en medidas alternativas de construcción. Se ha publicado un número creciente de artículos relacionados con la construcción con tierra cruda, en particular se puede destacar el trabajo de la Universidad Nacional de Tucumán, la Universidad Nacional Autónoma de México, la Pontificia Universidad Católica de Perú y la Universidad Nacional de Córdoba entre otras. En España aparece siguiendo esta tendencia el Instituto Eduardo Torroja en 1983.

La Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla se une a esta lista con la realización de campañas experimentales previas en de Trabajos Fin de Grado y Máster en la línea de investigación de bloques y muretes de adobe.

A continuación se recoge la situación actual de esta técnica de construcción así como los ámbitos a los que se aplica.

### 2.1 Actualidad

La construcción con tierra cruda data de hace más de 10.000 años cuando civilizaciones en expansión como la Mesopotámica o la egipcia edificaron sus primeros núcleos urbanos con tierra cruda, aunque las primeras aglomeraciones urbanas de las que se tienen vestigios son las de la ciudad de Jericó (*Arquitectura y Construcción con tierra, Tradición e Innovación*) [4]. En Asiria se encontraron cimientos de tierra apisonada de 5.000 años de antigüedad [2].

Según los datos recogidos en *Terracruda, La Diffusione Dell'architettura Di Terra* [5], en 2003 el reparto de las construcciones con tierra cruda de todo el mundo se sitúa principalmente en Latinoamérica, África, Oriente Medio, India y parte de Europa, Norteamérica, Australia y Asia. Cabe destacar que España está recogida como una zona con gran proporción de construcciones con tierra cruda.

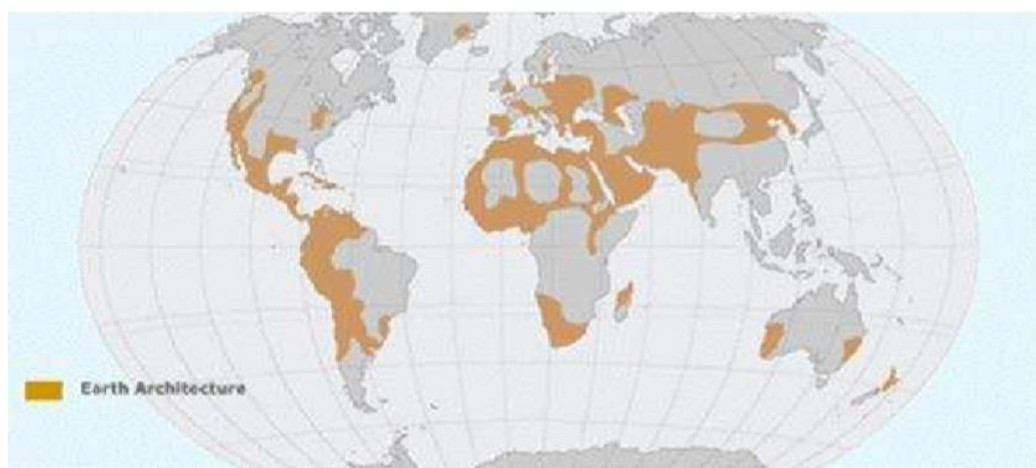


Ilustración 2: Localización geográfica de la arquitectura con tierra, [5]

Según dicho estudio se estima que un 30 % de la población mundial habita en viviendas construidas con tierra cruda. Como se observa en la ilustración anterior, una gran parte de los territorios donde está presente la arquitectura con tierra son países en vías de desarrollo con escasez de recursos económicos. En estos países la necesidad de vivienda unida a la versatilidad de este material de construcción llevan a la autoconstrucción, en muchos casos sin la necesidad de personal cualificado.

En España la ausencia de normativa referente a la construcción con tierra cruda supone un obstáculo en su crecimiento. Unida a la aparición en España del BTC a mediados de los años cincuenta apareció en el año 2008 la norma *UNE 41410:2008: Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques* [6].

En la actualidad se ha despertado de nuevo el interés la construcción con tapia, se ha mejorado el procedimiento y la consistencia de los resultados obtenidos es notable. Se han mejorado los encofrados hasta el punto de que algunos no necesitan travesaños y facilitan el montaje y desmontaje.



Ilustración 3: Construcción con tapia en la actualidad, [1]

## 2.2 Relevancia y aplicaciones de la técnica de tapia

Las aplicaciones de la construcción con tapia en la actualidad son considerables debido a su bajo coste e impacto ambiental.

En países en vías de desarrollo ofrece una función social, permitiendo el acceso a una vivienda de muy bajo coste y con la posibilidad de autoconstrucción.

Por otro lado, gran parte de los edificios históricos están contruidos mediante la técnica de tapia por lo que la investigación de las propiedades de este material desempeña un papel fundamental en la conservación del patrimonio histórico y es receptora de subvenciones. Aproximadamente un 25% del patrimonio que está en peligro de destrucción es de tierra, como ejemplo se puede destacar la Alhambra de Granada, España [3].



Ilustración 4: Alhambra de Granada, España

Como ámbitos de aplicación adicional, la tapia se ha incluido con éxito en la construcción de viviendas sustentables de impacto cero e incluso en la decoración, con muros de tapia en el interior de viviendas de hormigón como aislante térmico y elemento regulador de la humedad.



## 3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

La tierra cruda es un material de construcción que carece de estandarización, las características mecánicas dependen en gran medida del origen de la tierra y su composición. Esto lleva a la necesidad de crear un procedimiento de caracterización del material que pueda aplicarse a distintos tipos de tierra.

La motivación del estudio que se realiza en las páginas siguientes es la selección y caracterización mecánica de la mezcla de tierra y arena utilizada en la construcción de un punto de lectura en la localidad de Valverde de Burguillos, en Badajoz.

Para ello se ha llevado a cabo una campaña experimental en la que se han elaborado probetas de diferentes medidas mediante la técnica de tapia. A continuación, y tras el curado se han ensayado esas probetas en la máquina universal de ensayos a compresión simple, tracción indirecta y flexión a tres puntos.

Un objetivo adicional durante el proyecto fue la elaboración de un procedimiento de caracterización de tierra cruda y el desarrollo de un método de medida de la humedad in-situ en obra.

### 3.1 Construcción punto de lectura en Valverde de Burguillos

La motivación para la realización de este proyecto es, entre otras, la construcción de un punto de lectura en Valverde de Burguillos, Badajoz. Esta construcción se llevó a cabo en el marco del proyecto Erasmus + LearnBION (Building Impact Zero Network) y en colaboración con el Ayuntamiento de Valverde de Burguillos.



Ilustración 5: Vista en detalle del punto de lectura, Valverde de Burguillos

Los objetivos de este proyecto fueron, en primer lugar, la determinación de la mezcla de tierra y la humedad que se usarían para dicha construcción. Y, en segundo lugar, la realización de probetas con la misma tierra para determinar su comportamiento mecánico a compresión y tracción.

### 3.2 Campaña experimental

La programación de la campaña experimental se recoge en la tabla siguiente:

Tabla 1: Programación de la campaña experimental

<u>Semana 1</u> 19/02-23/02	Selección de dosificaciones Ensayo Próctor Normal
<u>Semana 2</u> 26/02-02/03	Ensayo Granulométrico Prueba Ultrasonidos
<u>Semana 3</u> 5/03-9/03	Preparación mezcla para probetas
<u>Semana 4</u> 12/03-16/03	Calibración TDR-150
<u>Semana 5</u> 9/04-13/04	Preparación moldes para probetas prismáticas
<u>Semana 6</u> 23/04-27/04	Pruebas a moldes y mejoras Visita obra de Valverde de Burguillos
<u>Semana 7</u> 30/04-04/05	Definición protocolo fabricación probetas (Pruebas, energía de compactacion...)
<u>Semana 8</u> 07/05-11/05	Cribado tierra. Obtención de la mezcla final <b>Fabricación de probetas</b> Medida de humedad de fabricación
<u>Semana 9</u> 14/05-18/05	<b>Fabricación probetas prismáticas y cilíndricas</b>
<u>Semana 10</u> 21/05-25/05	Prueba de moldes probetas flexión
<u>Semana 11</u> 28/05-1/06	<b>Fabricación probetas flexión</b>
<u>Semana 12</u> 18/06-22/06	Medida ultrasonidos Instalación bandas extensométricas Pruebas de ensayos a compresión y tracción
<u>Semana 13</u> 25/06-29/06	Ensayos a compresión simple Ensayos a tracción indirecta



### 3.3 Caracterización del material

Todo el trabajo de la campaña experimental recogido en la programación se realizó conjuntamente con Isabel Rodríguez Jiménez, exceptuando los ensayos finales de la Semana 13 en la que Isabel Rodríguez Jiménez realizó los ensayos a compresión simple y José Luis Bocanegra Cerrada realizó los ensayos a tracción indirecta y los ensayos de fractura por flexión a tres puntos.

Ambos trabajos son complementarios, el trabajo fin de grado *Caracterización del comportamiento a compresión simple sobre probetas de tapia* [1] incluye el proceso de selección de la tierra mediante análisis granulométrico y ensayos proctor, y los resultados de velocidad de propagación de ondas de ultrasonido y de los ensayos a compresión simple de las probetas.

En este trabajo las propiedades que se desean obtener como resultado de los ensayos son la resistencia a tracción indirecta  $f_{ct}$  y la energía de fractura por unidad de área  $G_f$ .

Además se relacionarán dichos resultados con otros parámetros como la energía de compactación, la humedad aportada a cada probeta durante su fabricación, la densidad, la velocidad de propagación de ultrasonidos.

## 4 DATOS PREVIOS DEL MATERIAL

El tipo de tierra utilizado para la construcción con tapia determina en gran medida sus cualidades y debe cumplir una serie de requisitos.

Los componentes de la tierra utilizada para la construcción de tapia sin estabilizar son arcilla, limo, arena y en algunos casos grava, siendo la arcilla el componente más importante puesto que es el que aporta la cohesión a la mezcla. Todos estos materiales se encuentran en la naturaleza de forma abundante en casi cualquier zona del planeta.

En lo que respecta a los estudios previos del material, este apartado se centra en la granulometría del material seleccionado mediante el ensayo Próctor. Este apartado se recoge de forma más extensa en el *Trabajo de Fin de Grado de Isabel Rodríguez, Caracterización del comportamiento a compresión simple sobre probetas de tapia* [1]. A continuación se muestran los resultados arrojados por el estudio granulométrico y la información más relevante.

La tierra escogida para la construcción del punto de lectura en Valverde de Burguillos y la utilizada para la campaña experimental procede de una cantera cercana a dicha localidad, Hormigones Hermanos Fernández S.L, una empresa dedicada a la explotación de áridos.

Se trata de una zahorra artificial denominada **ZA-25** con alto contenido en arcilla y una gran cantidad de áridos gruesos de un tamaño máximo de 25 mm.

Dicha zahorra se pasó a través de un tamiz de 20 mm para eliminar los áridos de mayor tamaño, y se mezcló en diferentes proporciones con una arena gravosa denominada SG que fue tamizada a 2 mm.



Ilustración 6: Zahorra artificial ZA-25, izquierda

Ilustración 7: Arena gravosa SG, antes de tamizar a 2 mm, derecha

Se realizaron tres mezclas con el fin de seleccionar la de mayor densidad seca en el ensayo Próctor normal.

Estas dosificaciones se recogen en la siguiente tabla:

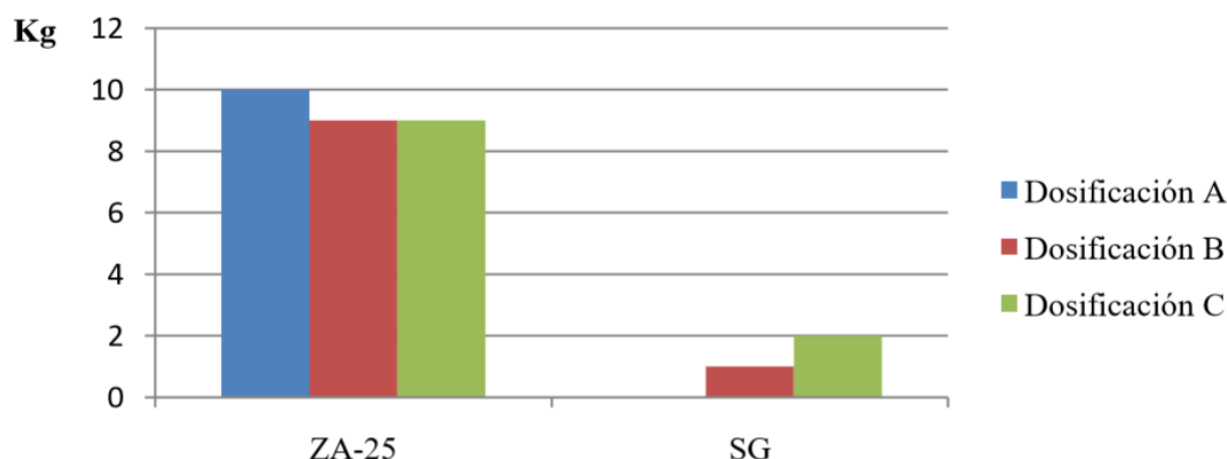


Ilustración 8: Dosificaciones, Isabel Rodríguez Jiménez [1]

Finalmente, tras el ensayo Próctor, la dosificación que mayor densidad seca obtuvo fue la C. Esta dosificación 9 ZA-25 y 2 Arena es la que se ha utilizado en las probetas y en la construcción del punto de lectura.

Los ensayos Próctor y granulométricos fueron realizados en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla por Isabel Rodríguez Jiménez, Arturo Jiménez Viera y José Luis Bocanegra Cerrada.

## 4.1 Ensayo Proctor

Los ensayos Proctor sobre las distintas dosificaciones se llevaron a cabo de acuerdo con la norma *UNE 103-105-94: Ensayo de Compactación. Proctor Normal* [7]. Estos ensayos se realizaron con la finalidad de encontrar el grado de humedad para el que la mezcla de tierra obtiene la mayor densidad para una energía de compactación dada.

La relevancia de este estudio se debe a la relación existente entre densidad y resistencia, en general, una probeta de tierra compactada ofrece una mayor resistencia cuanto mayor sea su densidad seca. Una mayor densidad implica menor número de huecos dentro de la probeta y mayor sección efectiva a la hora de soportar los esfuerzos.

### 4.1.1 Descripción del ensayo

En ensayo consiste en la compactación de la tierra por medio de un pisón metálico dentro de un molde cilíndrico de  $1000 \text{ cm}^3$ . La compactación se lleva a cabo en tres capas o tongadas. En cada tongada se realizan 26 golpes dejando caer el pisón sobre la superficie de la tierra, el pisón tiene una masa de 2,5 kg y un recorrido de 305 mm.

Una vez realizada la compactación, se enrasa en molde y se pesa. Posteriormente, se abre el molde y se toman varias muestras de tierra de diferentes partes y se determina la humedad mediante secado en estufa.

La densidad seca se calcula a partir del volumen del molde, la masa de tierra húmeda y la humedad de la tierra del molde.

La energía aportada a la tierra se calcula según:

$$\frac{E_c}{V} = \frac{n_c \cdot (N \cdot m_p \cdot g \cdot h_c)}{V} = 583449,75 \frac{J}{m^3}$$

Donde:

$E_c$  <sup>def</sup> Energía de compactación

$n_c$  <sup>def</sup> Número de capas

$N$  <sup>def</sup> Número de golpes por capa

$m_p$  <sup>def</sup> Masa del pisón

$g$  <sup>def</sup> Aceleración de la gravedad

$h_c$  <sup>def</sup> Altura de caída del pisón

#### 4.1.2 Resultados del ensayo Proctor

Como resultado del ensayo se obtiene una curva de densidad seca frente a la humedad de la tierra durante la compactación.

La mayor densidad se consiguió con la dosificación C, que se muestra a continuación:

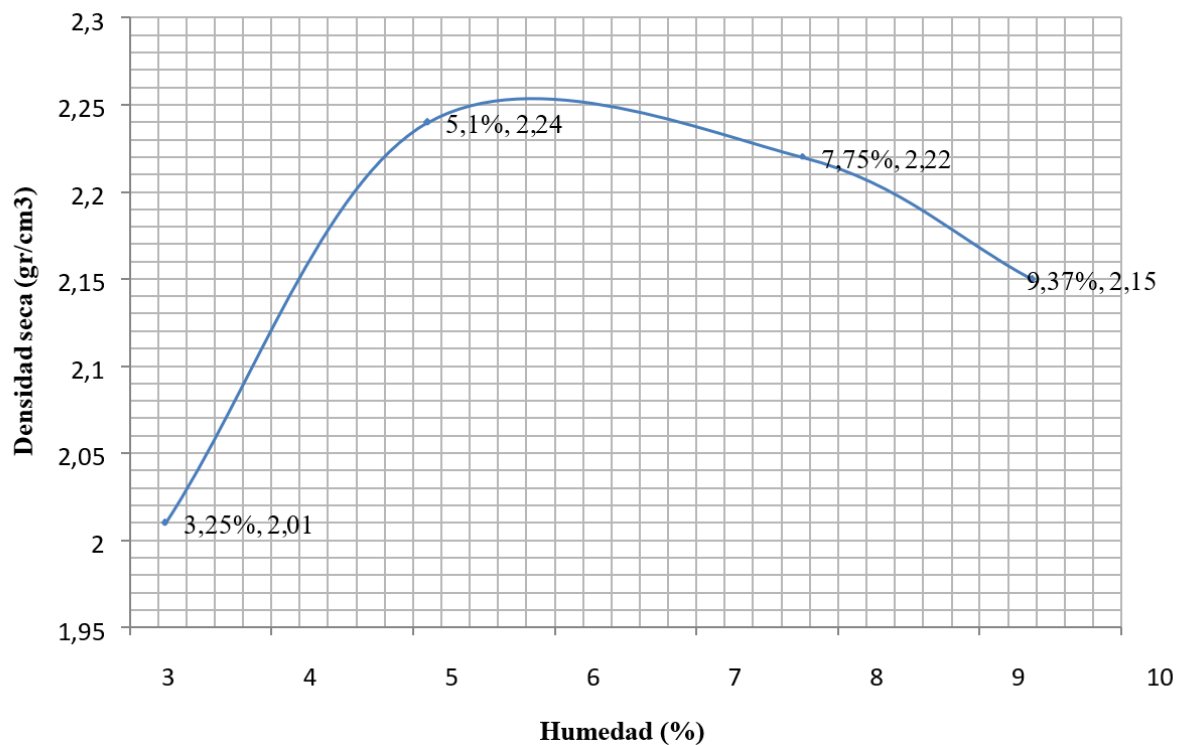


Ilustración 9: Ensayo Próctor Dosificación C (9Tierra/2Arena)

Se observa como la densidad óptima 2,25 g/cm<sup>3</sup> se obtiene para una humedad de en torno al 5,6 % en peso.

## 4.2 Granulometría del material

Se pueden clasificar las partículas que componen la tierra en función de su tamaño según el *Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS)* [8]:

- Grava: Partículas entre 4,76 y 75 mm
- Arena: Partículas entre 0,075 y 4,76 mm
- Limo: Partículas entre 0,002 y 0,075 mm
- Arcilla: Partículas menores de 0,002 mm

Algunos autores recomiendan una distribución específica de las partículas para la tierra utilizada en la construcción con tapia, a continuación se muestran algunas.

Los valores recomendados por Standards Australia, 2002 [9] son:

- Grava y arena: 45-75%
- Limo: 10-30%
- Arcilla: >20%

Los valores recomendados por el Piet-70, del Instituto Eduardo Torroja [10] son:

- Grava: 10-20%
- Arena: 10-40%
- Limo: 20-40%
- Arcilla: 10-40%

Existen numerosos autores que recomiendan diferentes proporciones de las partículas, sin embargo estas proporciones deben entenderse de forma orientativa y no como una norma.

Los datos de granulometría que se muestran en los apartados siguientes corresponden a la dosificación utilizada en obra, para ver los datos correspondientes a otras dosificaciones ver el Trabajo de Fin de Grado de Isabel Rodríguez Jiménez [1].

Los estudios granulométricos se realizaron de acuerdo con la norma *UNE 7050-2:97* y *UNE 103 102:1995*.

### 4.2.1 Estudio de granulometría de la mezcla final

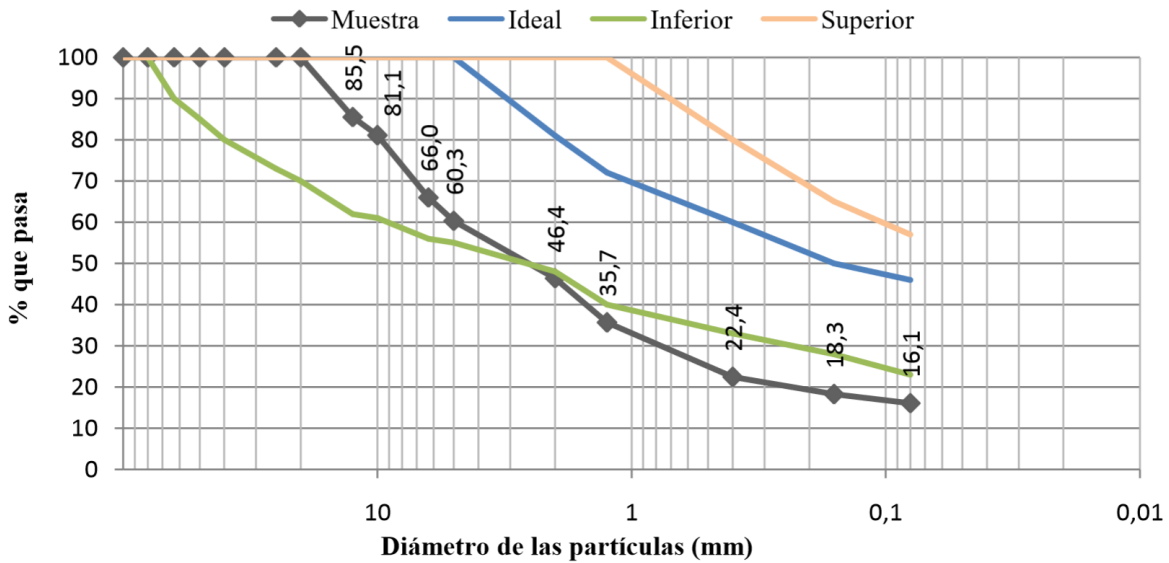


Ilustración 10: Curva granulométrica de la dosificación C, Isabel Rodríguez Jiménez [1]

Tras el primer estudio granulométrico mostrado en la imagen anterior y la realización de varias probetas de prueba se decidió que el tamaño de áridos gruesos era excesivo debido al tamaño de las probetas. Partículas de **20mm**, aunque es un tamaño aceptable para la construcción de muros de tapia, representaban una parte importante de la sección de las probetas cuyas secciones eran de 100x100 mm para las prismáticas y de diámetro 100mm para las cilíndricas. Esto provoca discontinuidades y posibles huecos en la superficie y esquinas de las probetas.

Se decidió pasar la Dosificación C a través de un tamiz de **12mm** consiguiéndose así la siguiente curva granulométrica y un mejor acabado superficial de las probetas.

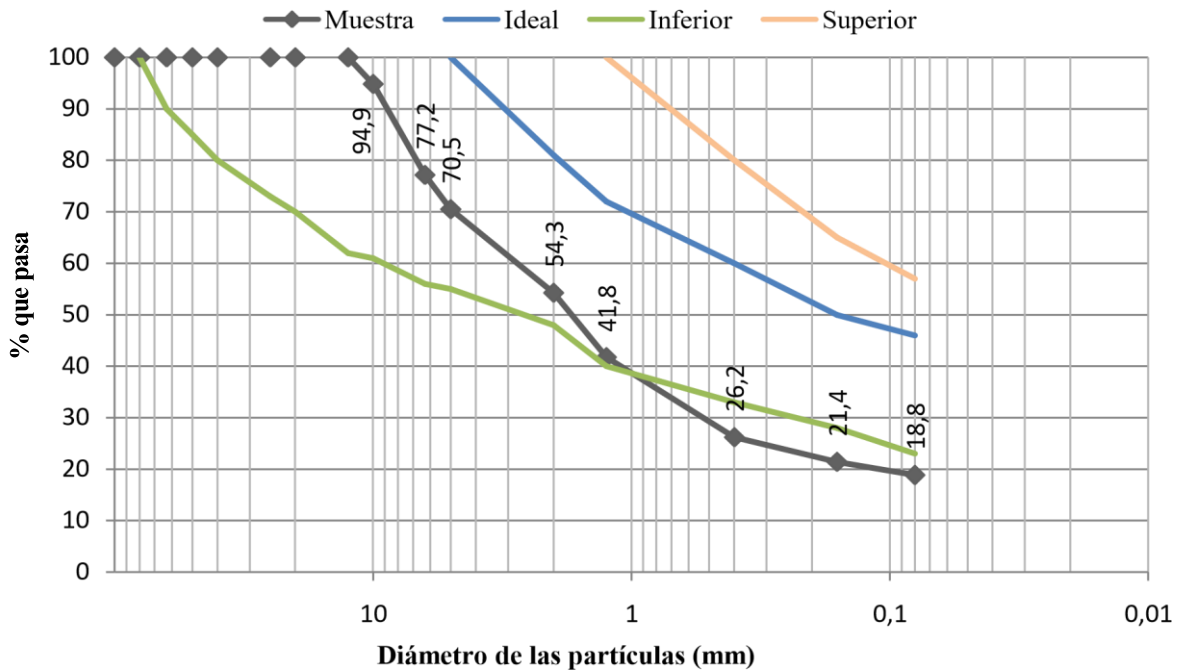


Ilustración 11: Curva granulométrica final, Isabel Rodríguez Jiménez [1]

Con la siguiente distribución de tamaño de partículas:

- **% Grava:** 45,73%
- **% Arena:** 35,44%
- **% Finos:** 18,83%

## 5 MEDIDA DE HUMEDAD MEDIANTE TDR

La humedad de la tierra con la que se construye la tapia es un parámetro muy importante, puesto que determina la compactación que alcanzará y la maleabilidad de la mezcla a la hora de apisonarla. Una medida de precisión de la humedad de la tierra para suelos arcillosos requiere de secado en horno a una temperatura de entre 105 y 115°C hasta que la masa permanezca constante según la norma *UNE 103-300, Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa 1993* [11].

Esto implica que la medida en tiempo real de la humedad en la obra se lleve a cabo por otros métodos más tradicionales como puede ser la apariencia de la tierra, la consistencia, el tacto o la plasticidad.

En el caso de la construcción con tapia en la piscina de Valverde del Burguillos, el control de la humedad se llevó a cabo por medios cualitativos, dando mayor importancia a la facilidad de manejo de la tierra a la hora de trabajar.

Esta falta de rigor motivó la búsqueda de un procedimiento y utillaje adecuados para medir de forma efectiva la humedad in situ durante la construcción. En una primera aproximación al problema se pensó en utilizar un aparato de medida de la humedad llamado Fieldscout TDR 150, que se utiliza principalmente para medir la humedad y salinidad de suelos de cultivo.



Ilustración 12: Fieldscout TDR 150

Para la medición de la humedad, se emplea la técnica TDR (Time Domain Reflectometry) que se explicará a continuación.

### 5.1 Descripción técnica de medida

#### 5.1.1 Fundamento teórico de la técnica

El fundamento detrás de la técnica de medida utilizada es el Time Domain Reflectometry o TDR, que consiste en medir el tiempo de viaje de una onda electromagnética a lo largo de una guía de onda. La velocidad de la onda en la tierra depende de la permitividad dieléctrica del suelo ( $\epsilon$ ). El hecho de que el agua ( $\epsilon=80$ ) tiene una constante dieléctrica mucho mayor que el aire ( $\epsilon=1$ ) y los sólidos que forman el suelo ( $\epsilon=3-7$ ) se utiliza para determinar el contenido de agua en volumen VWC (Volume Water Content) del suelo. El VWC medido por el TDR es una media sobre la longitud de la guía de onda.

La electrónica en el TDR 150 genera y recibe de regreso una señal de alta energía que viaja hacia abajo en la



tierra a través de dos varillas de acero inoxidable reemplazables que hacen de guía de onda. El volumen de la muestra es un cilindro elíptico que se extiende aproximadamente 3 cm fuera de las varillas. La información de la señal de alta frecuencia se transforma entonces en la medida de VWC.

Grandes cantidades de arcilla en la tierra o una conductividad eléctrica (EC) elevada ( $EC > 2$  mS/cm) puede hacer que se atenúe la señal de alta frecuencia y que las medidas obtenidas sean afectadas. Un gran contenido de materia orgánica en la tierra afectará de forma similar a las medidas de VWC.

### 5.1.2 Descripción del equipo de medida

El TDR 150 mide el tiempo de viaje de la onda a lo largo de la guía de onda (varillas de acero inoxidable) y lo muestra por pantalla en la variable Period en unidades de tiempo,  $\mu$ s.

Su firmware incluye tres curvas de calibración que relacionan este Period con el contenido de humedad en volumen VWC correspondiente para tres tipos de suelos: Standard, High Clay y Sand. Estas calibraciones corresponden a suelos estándar, con alto contenido en arcillas y arenosos respectivamente.

Hay varias longitudes de las varillas que actúan como guía de sonda, estas varillas se fijan mediante una rosca y son reemplazables. El tamaño de la varilla utilizado para la toma de medidas relacionadas con este trabajo será de 3 pulgadas.

Las especificaciones del equipo de medida se recogen en la tabla a continuación, tomada del manual proporcionado por el vendedor en [https://www.specmeters.com/assets/1/22/6445\\_TDR\\_150\\_manual\\_web.pdf](https://www.specmeters.com/assets/1/22/6445_TDR_150_manual_web.pdf)

Tabla 2: Especificaciones Fieldscout TDR 150

## SPECIFICATIONS

<b>Measurement</b>	Percent volumetric water content (VWC)	
<b>Units</b>	Period (raw sensor reading)	
<b>Resolution</b>	<b>VWC:</b> 0.1% VWC units <b>EC:</b> 0.01 mS/cm <b>Temperature:</b> 0.2 °F (0.1 °C)	
<b>Accuracy</b>	<b>VWC:</b> $\pm 3.0\%$ volumetric water content with electrical conductivity $< 2$ mS/cm <b>EC:</b> $\pm 0.1$ mS/cm <b>Temperature:</b> $\pm 1.8$ °F ( $\pm 1$ °C)	
<b>Range</b>	<b>VWC:</b> 0% to saturation ( <i>Saturation is typically around 50% volumetric water</i> ) <b>EC:</b> 0 to 5 mS/cm <b>Temperature:</b> -22 to 140 °F (-30 to 60 °C)	
<b>Power</b>	4 AA batteries Lithium batteries will optimize battery life	
<b>Display</b>	Backlit, high-contrast, graphic LCD	
<b>Weight</b>	1.4 lbs. (640 g)	
<b>Probe Head Dimensions</b>	2.4" x 1.4" (6cm x 3.5cm)	
<b>Available Rod Dimensions</b>	Turf 1.5" (3.8cm) Short 3" (7.6cm) Med 4.7" (12cm) Long 7.9" (20cm)	Diameter: 0.2" (0.5cm) Spacing: 1.2" (3cm)
<b>GPS*</b>	Accuracy $< 2.5$ m	
<b>Logger Capacity</b>	50,000 measurements	

## 5.2 Calibración del equipo de medida

Como se ha mencionado en el punto anterior, el equipo de medida TDR 150 consta de tres calibraciones internas en su software. Sin embargo, utilizando la medida Period se pueden realizar calibraciones específicas para cada suelo realizando una curva de calibración, para ello se toman medidas para varios porcentajes de humedad de una muestra de tierra cuya humedad es conocida y posteriormente se relaciona la nube de puntos Period-Humedad mediante una regresión. Esta opción es la que se utilizará para la medición de la humedad de la tierra en el presente trabajo. El contenido de agua de la mezcla de tierra (Humedad) se medirá en este caso por conveniencia en porcentaje en peso. Siendo  $M$  la masa de la muestra

$$\text{Humedad} = \frac{(M_{\text{húmedo}} - M_{\text{seco}})}{M_{\text{seco}}} \cdot 100$$

Para la calibración y posterior utilización del equipo de medida se utilizaron las varillas de 3 pulgadas (7,6 cm) por ser más fáciles de introducir en la tierra utilizada para la elaboración de las probetas. Esta tierra presenta una importante cantidad de grava y áridos de un tamaño cercano a 12 mm que dificultan la inserción de varillas de mayor longitud.

### 5.2.1 Procedimiento

Para la calibración del TDR 150 es necesario conocer con precisión el valor de la humedad de la muestra para así relacionar las parejas de puntos Periodo-Humedad que mediante una regresión darán lugar a la curva de calibración.

Este control de la humedad se llevó a cabo determinando la humedad de la tierra de partida y añadiendo progresivamente agua de forma controlada para tener una serie de medidas del sensor para cada nivel de humedad.

A la hora de calibrar el instrumento de medida se deben tomar medidas en un rango de humedad similar al de las humedades que está destinado a medir. En este caso, para probetas de tapia no suelen requerirse niveles de humedad muy elevados y el rango de medidas podría oscilar entre 1% para tierra seca y 7-8% para tierra muy húmeda. El nivel óptimo de humedad según el ensayo Próctor normal para la mezcla seleccionada es del 5,6%.

Sin embargo, con el fin de mejorar el comportamiento de la curva de calibración y evitar comportamientos anómalos de las regresiones polinómicas en los extremos del intervalo de calibración, se realizarán medidas para humedades que van desde el 1% hasta el 10% en peso.

El procedimiento para la calibración del sensor se recoge punto por punto a continuación:

1. Configuración del aparato de medida

Es necesario comprobar que la configuración del aparato es correcta, se debe comprobar que las varillas instaladas coinciden con las seleccionadas en el menú **Setup** del sensor. Además, se elige la opción **Period** para la salida por pantalla.

2. Selección de la muestra de tierra

Se rellena con tierra con que se realizarán las probetas un cubo de plástico lo suficientemente grande para que el volumen de muestra no interfiera con las paredes del cubo. El volumen de muestra del sensor es un cilindro elíptico que sobresale 3 cm por fuera de las varillas. En este caso se utilizó un cubo de unos 10 litros aproximadamente que se pesó en vacío previamente.

Además, se toma una muestra de unos 500 g de la tierra de dicho cubo y se introduce en un recipiente metálico o cerámico previamente tarado.

3. Determinación de la humedad de la tierra de partida

Al estar la tierra en contacto con el aire en el laboratorio la humedad de partida será distinta de cero.

Se determina la humedad de partida de dicha tierra se realizando un secado en estufa de una muestra representativa según la norma UNE 103-300 [11]. Para ello se apartan unos 500 g de tierra del cubo

en un recipiente metálico o cerámico y se seca en el horno a 110°C hasta masa constante. La humedad inicial de la muestra se determina a través del pesado antes y después del secado en estufa.

$$Humedad_{inicial} = \frac{(M_{húmedo} - M_{seco})}{M_{seco}} \cdot 100$$

#### 4. Pesado de la muestra

Se pesa el cubo de tierra completo y se resta el peso del cubo. De este modo se obtiene la masa de tierra inicial:

$$M_{inicial}$$

#### 5. Cálculo de la masa seca

La masa inicial tiene un porcentaje de humedad por lo que para conocer la masa seca  $M_{seca}$ :

$$M_{seca} = \frac{M_{inicial} \cdot 100}{(100 + Humedad_{inicial})}$$

#### 6. Toma de medidas

En primer lugar, se elige un número de medidas representativo para cada nivel de humedad, para la calibración del TDR se emplearon diez muestras para cada nivel de humedad.

En segundo lugar, se debe decidir cuantos niveles de humedad diferentes se medirán, para estas curvas de calibración se midieron humedades desde el 1% en peso hasta el 10% en peso añadiendo progresivamente 1% tras cada medida con un total de diez niveles diferentes de humedad.

El proceso de medida se detalla a continuación, haciendo especial énfasis en la necesidad de que la mezcla de tierra y agua debe ser lo más homogénea posible para evitar una diferencia de humedades dentro de la muestra.

- Partiendo de la tierra que hay en el cubo se toman 5 medidas en partes diferentes de la superficie de la tierra, clavando las varillas completamente con un movimiento vertical, deben evitarse movimientos laterales de las varillas que pueden crear huecos en la tierra y alterar las mediciones. Los resultados deben ser apuntados en una tabla que recoja el valor **Period** medido por el TDR y la humedad de la tierra correspondiente a dichas mediciones.
- Se remueve la tierra dentro del cubo con, por ejemplo, una paleta de albañil, una cuchara de jardinería o una mezcladora de mortero manual. Esto se hace para eliminar los huecos que las medidas anteriores hayan podido generar al introducir las varillas, además sirve para tener medidas más homogéneas en caso de que el agua haya caído hacia la parte inferior del cubo debido a la gravedad.
- Se toman otras 5 medidas repitiendo el punto **a**. Con esto se tienen las 10 muestras para este nivel de humedad.
- Se añade una cantidad de agua correspondiente a un 1% en peso calculado sobre la masa seca

$$M_{agua\ añadida} = 0,01 \cdot M_{seca}$$

- Se mezcla la tierra con el agua, que debe ser añadida de forma progresiva evitando así crear terrones de tierra mucho más húmeda que el resto lo cual dificulta el mezclado.

Para la mezcla es conveniente utilizar otro cubo del mismo tamaño o mayor para trasvasar la tierra de un recipiente a otro. Esto se hace por que resulta muy difícil mezclar la tierra que queda en el fondo del cubo, además al verter la tierra de un recipiente a otro se combate la falta de homogeneidad de la tierra puesto que la tierra que estaba en un principio en el fondo pasa a estar arriba tras ser trasvasada. El trasvase se puede repetir hasta alcanzar la mezcla completa y homogénea.

Es importante que en el proceso de trasvase no se pierda tierra y que no quede tierra adherida al recipiente auxiliar ya que la cantidad de agua que se le añade está calculada sobre la masa

de tierra seca inicial y no debe perderse tierra en el procedimiento.

Una vez mezclada la tierra se vuelve al punto **a.** y se repite el procedimiento de medida hasta alcanzar una humedad de la tierra del 10%.

## 5.2.2 Resultado

El procedimiento anterior se repitió tres veces para tres muestras de tierra en tres días diferentes. Los resultados obtenidos para la humedad inicial de la tierra fueron idénticos por lo que se puede asumir que la humedad ambiental de la tierra almacenada en el laboratorio permanece aproximadamente constante.

Los datos medidos por el TDR 150 para las humedades dadas se pueden transformar en una curva de calibración mediante una regresión. Se ha optado por una regresión polinómica elaborada introduciendo las parejas de valores Period-Humedad en MatLab y utilizando la función *polyfit* y *polyval* que generan dicha regresión de grado N dados los dos vectores de datos. Se han elegido polinomios de grado N=4 para las regresiones por aproximar adecuadamente la tendencia de los puntos medidos.

### 5.2.2.1 Curvas de calibración

A continuación se muestran las curvas de regresión para las tres calibraciones realizadas, Period medido en  $\mu\text{s}$  y EC en  $\text{mS/cm}$ :

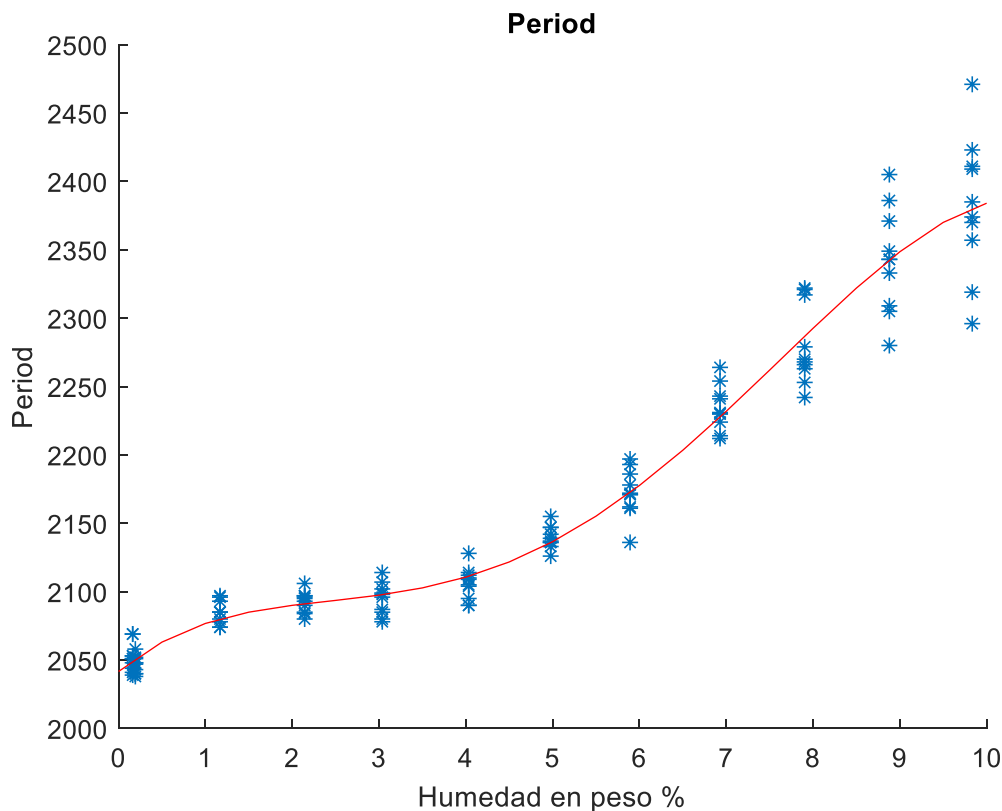


Ilustración 13: Curva calibración 1, Period

La calibración 1 presenta una mayor dispersión de los puntos que puede ser causada debido a que a la hora de añadir agua y mezclar sólo se utilizó un cubo y la mezcla de la tierra resultaba difícil en la parte inferior del cubo.

En las calibraciones 2 y 3 se utilizó un cubo auxiliar para hacer trasvases entre cubos y se consiguió mayor homogeneidad.

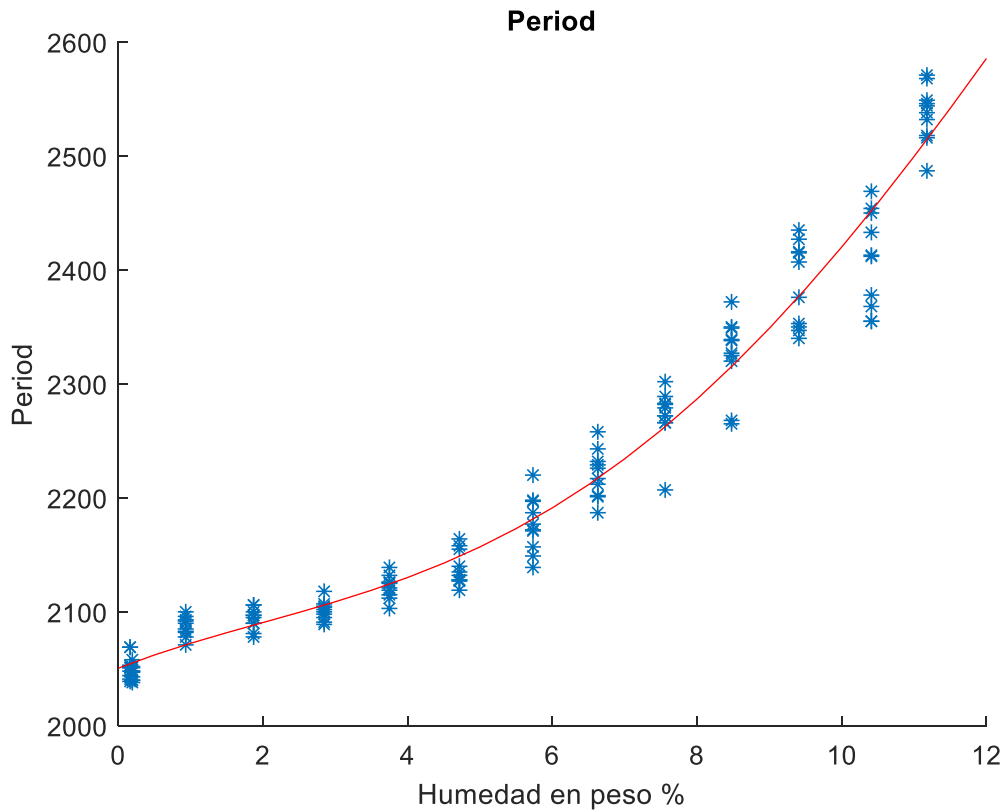


Ilustración 14: Curva de calibración 2, Period

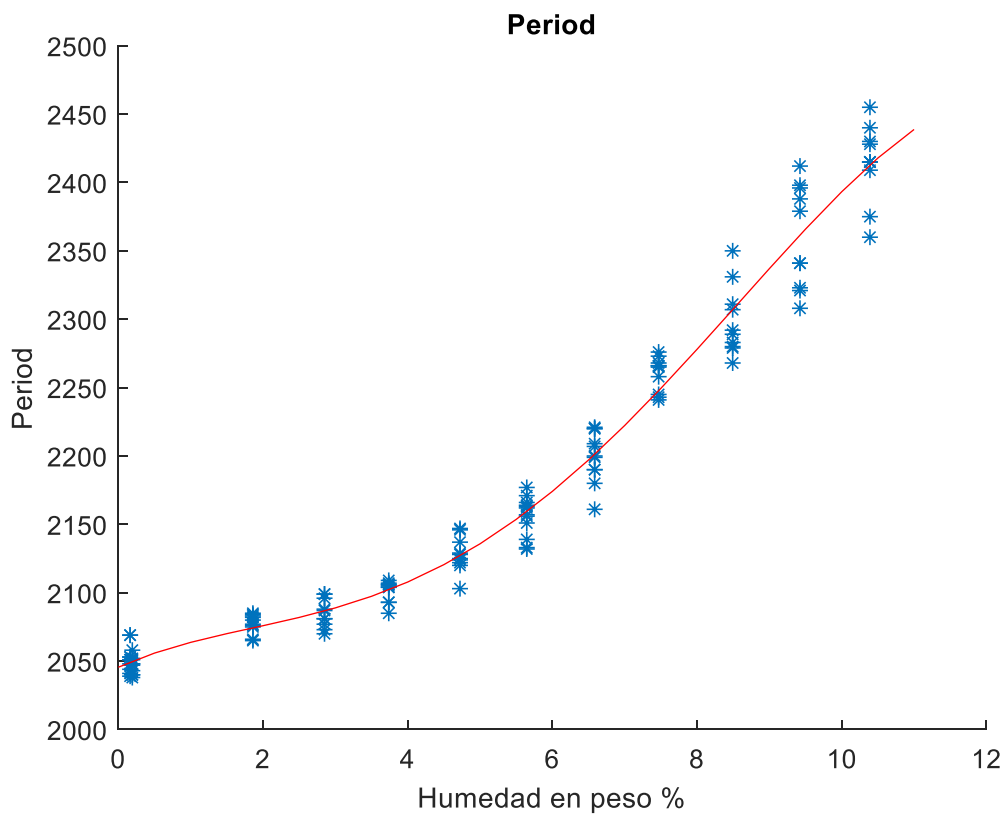


Ilustración 15: Curva de calibración 3, Period

Al igual que con la variable **Period**, se realizaron curvas de calibración con la variable **EC** (Electric Conductivity):

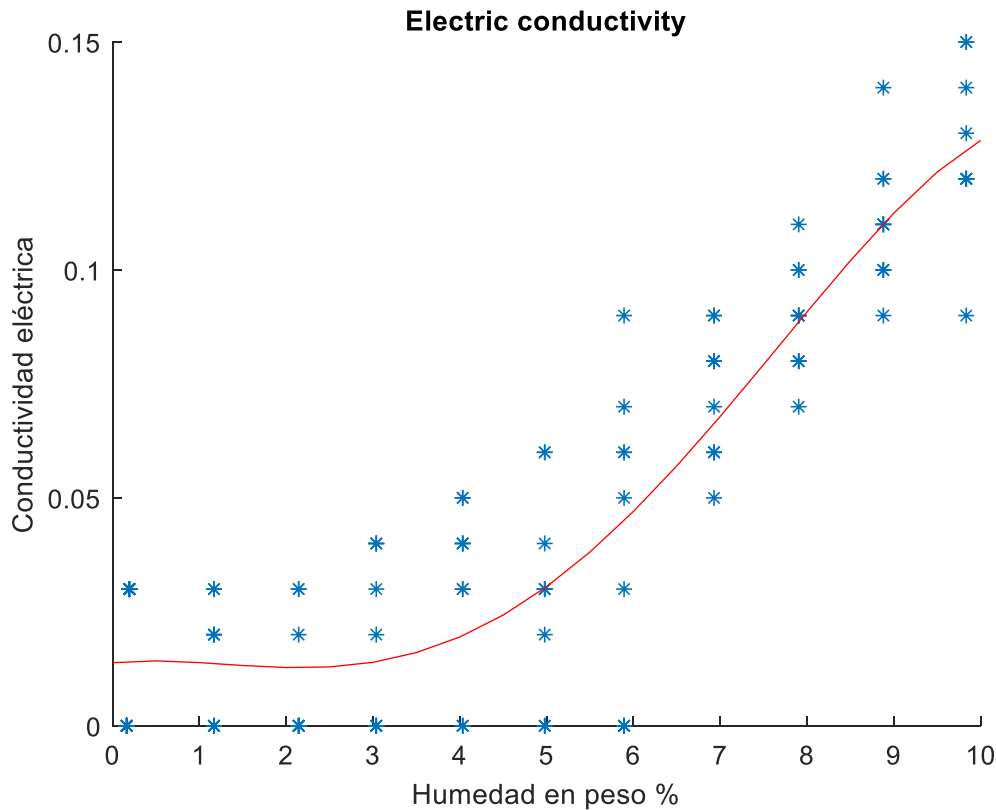


Ilustración 16: Curva de calibración 1, Electric Conductivity

Pero a la vista de los resultados hay una gran dispersión de las medidas de conductividad eléctrica y el sensor mide valores similares de EC para dos medidas separadas hasta un 6% de humedad. Por esta razón no es una medida adecuada de la humedad y se descartó este tipo de calibración.

### 5.2.2.2 Programa para el cálculo de humedad a partir de la medida del TDR

Una vez se tienen las curvas de calibración se puede calcular la humedad que corresponde a cada valor de la magnitud **Period** medida. Para ello se calcula el punto de intersección de dicho valor de la medida **Period** con la curva de calibración.

Al haberse realizado tres curvas de calibración, la curva de calibración final será una media de las tres curvas para mayor precisión.

Los puntos de corte del valor medido por el TDR, **Period**, con la curva de calibración se calcula utilizando la función *fzero* de MatLab. En la ilustración siguiente se muestran las curvas de calibración y los resultados de humedad calculados para un vector aleatorio de mediciones del TDR.

El programa elaborado para el cálculo de la humedad recibe un vector de entrada **Period**, de cualquier longitud y devuelve un vector de salida **humedad** de la misma longitud con los valores de porcentaje en peso de agua.

Por ejemplo, para un vector de entrada cualquiera:

```
Period= [2065 2150 2183 2203 2122 2309 2450]
```

Devuelve un vector con la humedad correspondiente según la regresión:

```
humedad = [0.9735 5.0648 5.9635 6.4354 4.1126 8.4691 10.8099]
```

Además de una gráfica con la situación de cada punto, como se muestra a continuación:

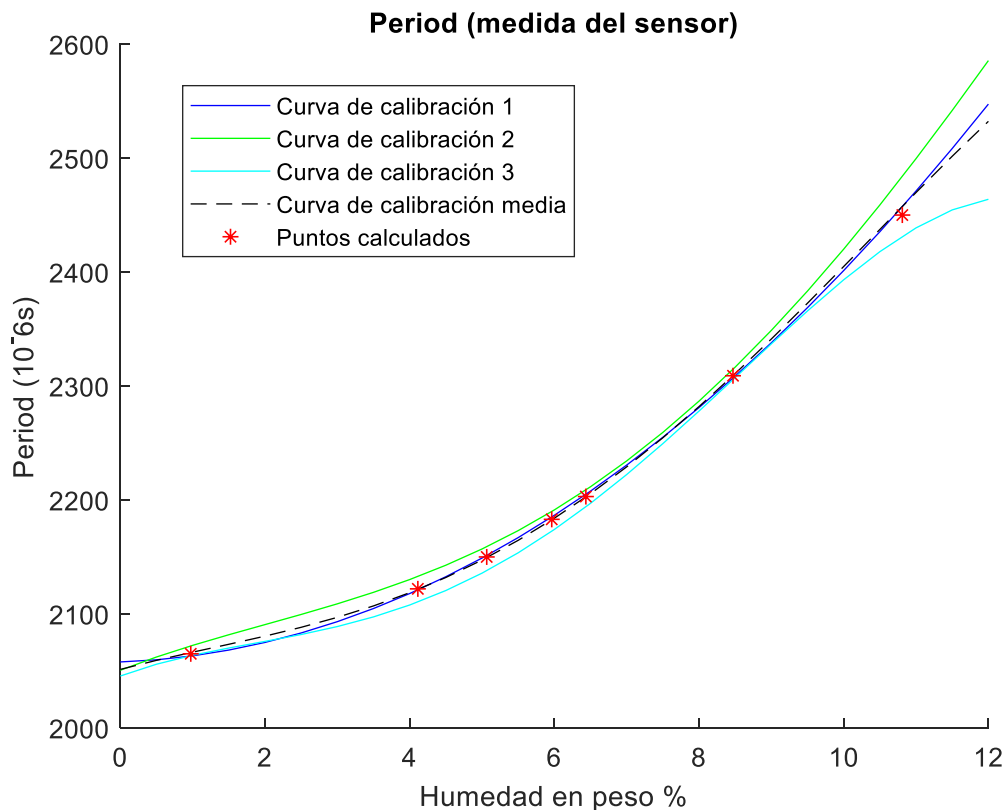


Ilustración 17: Cálculo de la humedad

Para valores menores a 2050  $\mu$ s de la medida del TDR la humedad es muy cercana a 0 y es difícil de calcularla. Es importante hacer notar que al medir humedades pequeñas se produce más error por que la curva de calibración tiene menor pendiente.

### 5.2.3 Aplicaciones

Como se observa en las gráficas anteriores, el error máximo de una medición aislada con respecto a la humedad real puede llegar a aproximadamente el  $\pm 2\%$ . Sin embargo, si se toma más de una medición para cada nivel de humedad el error se reduce drásticamente. Prueba de ello es que las tres curvas de calibración prácticamente se solapan y el error se disminuye al aumentar el número de mediciones.

Siempre existirá una desviación con respecto a la media de humedad de la mezcla debido a la falta de homogeneidad del material, sin embargo este método de medida in situ es suficientemente preciso y simple para su utilización en obra.

Los métodos alternativos de medición de la humedad tienden a ser cualitativos y dependen de la experiencia del constructor debido a que son de origen tradicional. La medición por medio de TDR puede aportar el carácter cuantitativo a la medición y ayudar a la estandarización de los métodos de construcción con tierra cruda.

# 6 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

Para la elaboración de las probetas se creó un procedimiento riguroso que eliminase gran parte de los errores humanos, y así reducir la desviación en sus propiedades. Dicho procedimiento se recoge en los subapartados siguientes.

Los pasos seguidos para la fabricación que se desarrollan en los siguientes subapartados se recogen de forma ordenada en el siguiente esquema a modo de resumen.



Ilustración 18: Proceso de fabricación de las probetas, [1].

Además se recoge el proceso de fabricación de los moldes y su puesta a punto, un seguimiento de las características de las probetas durante su fabricación y los datos de compactación tomados de la máquina universal de ensayos.

## 6.1 Consideraciones previas

Como pasos previos a la fabricación de las probetas fue necesario establecer sus dimensiones y el número tongadas de las que constarían, así como la dirección en la que se compactarían y su densidad final.

### 6.1.1 Dimensiones

Para decidir las medidas de las probetas prismáticas se tuvo en cuenta el tamaño máximo del árido de la tierra utilizada para que no fuera demasiado grande en comparación, para así evitar falta de homogeneidad en la probeta, dificultades en el relleno de huecos y esquinas y un acabado superficial demasiado irregular.

Con estas consideraciones presentes se decidió la fabricación de probetas prismáticas de 100x100x200 mm para los ensayos de compresión simple y tracción indirecta. Y probetas de 100x450x100 mm para los ensayos de flexión a tres puntos, las mismas dimensiones de las probetas de hormigón que emplean para dicho ensayo.

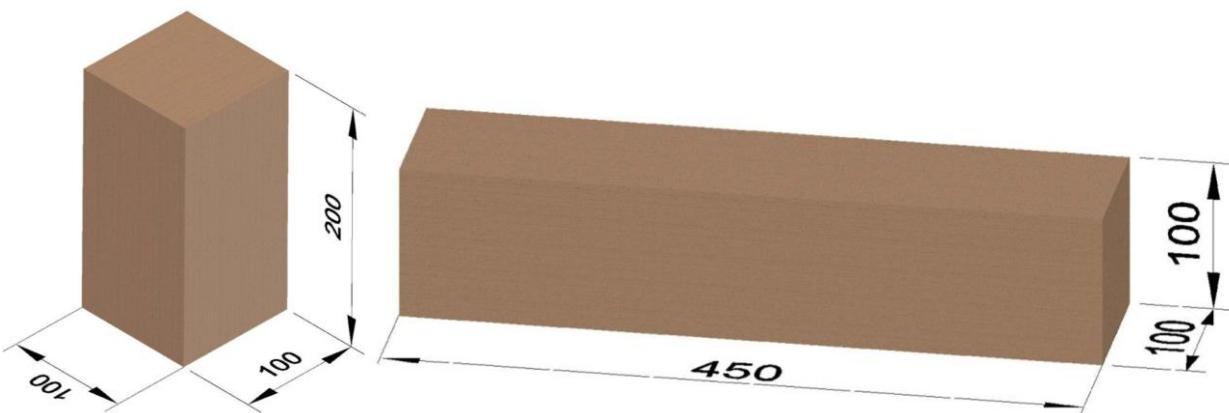


Ilustración 19: Dimensiones de fabricación 100x100x200 mm, cotas en mm [1]

Ilustración 20: Dimensiones de fabricación de probetas prismáticas 100x100x450 mm, cotas en mm [1]



Debido a la disponibilidad de moldes cilíndricos de 100 mm de diámetro en el laboratorio se eligió este diámetro para las probetas cilíndricas que serían destinadas a ensayos de compresión simple y tracción indirecta o ensayo brasileño.

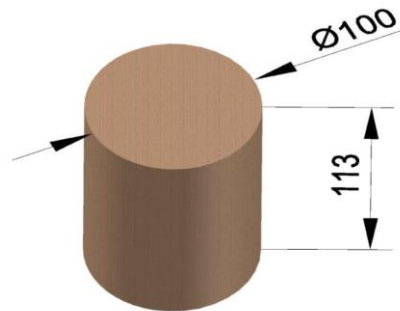


Ilustración 21: Dimensiones de fabricación probetas cilíndricas, cotas en mm [1]

### 6.1.2 Dirección de compactación

La construcción con tapia se realiza tradicionalmente compactando la tierra de forma vertical aprovechando la caída de los pisones por la acción de la gravedad. Las cargas principales a las que se ven sometidos los muros de tapia son de compresión en la dirección vertical y son perpendiculares a la dirección de compactación y a las diferentes tongadas de tierra.

En la técnica de tapia se apilan varias tongadas de tierra compactada, quedando así una interfase de unión entre capas. Esta interfase puede presentar menor resistencia o puntos débiles en caso de que la carga a la que se somete tenga como efecto separar dicha superficie de contacto.

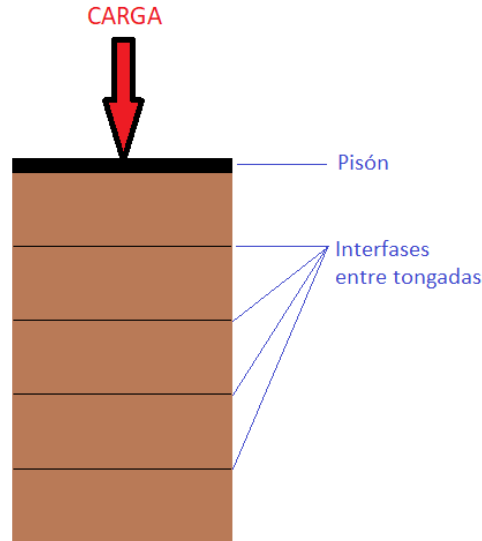


Ilustración 22: Compactación de la tierra mediante la técnica de tapia

En la fabricación de las probetas de tapia se ha elegido la dirección de compactación de manera que las cargas del ensayo de compresión simple sean perpendiculares a la dirección de compactación y a las diferentes tongadas de tierra. La razón es recrear de la forma más fiel el comportamiento de los muros de tapia y evitar puntos débiles producidos por la interfase de contacto entre tongadas.

Asímismo, también se han tenido en cuenta los ensayos de tracción para la determinación de la dirección de compactación de manera que la dirección de compactación se encuentre contenida en los planos de fractura de las probetas.

### 6.1.3 Densidad objetivo, número de tongadas y método de compactación

Se consiguió una densidad seca máxima de  $2,25 \text{ gr/cm}^3$  para una humedad de la tierra de 5,6% y una energía de compactación:

$$\frac{E_c}{V} = \frac{n_c \cdot (N \cdot m_p \cdot g \cdot h_c)}{V} = 583449,75 \frac{J}{m^3}$$

Como ya se calculó en el apartado 4.1.1.

Para la fabricación de las probetas se decidió utilizar dicha energía de compactación por unidad de volumen como parámetro de control para obtener la máxima densidad seca del ensayo próctor.

Para el molde del ensayo próctor que tiene un volumen de un litro, dicha energía se aplica en 3 capas dando 26 golpes por capa con un pisón de 2,5 kg y una caída de 305 mm. Los volúmenes de las probetas, 2 y 4,5 litros, son mayores a los del ensayo próctor y por tanto requiere que se aumente alguno de los factores para conseguir la misma energía de compactación. Se podría aumentar la masa del pisón, la distancia de caída, y el número de golpes y de tongadas.

Se estudiaron varias combinaciones de masa de pisón, distancia de caída, número de tongadas y número de golpes por tongada. Un aumento en el número de golpes, o tongadas producía un aumento significativo en el tiempo de fabricación de las probetas a lo que ya de por sí es un proceso lento.

Otra posibilidad era el aumento de la masa del pisón o la altura de caída de este. Sin embargo, las combinaciones de masa de pisón y su recorrido llevaban a pisones demasiado pesados o grandes para un manejo cómodo.

La compactación manual puede producir una desviación entre las propiedades de las probetas además de la posible falta de homogeneidad en diferentes partes de la misma probeta. Esto es debido a que el punto de impacto del pisón sobre la superficie de la tierra puede variar de una probeta a otra al hacerse de forma manual.

Para aumentar la precisión en la medición de la energía de compactación, para eliminar faltas de homogeneidad y para aumentar la velocidad en la fabricación de las probetas se optó finalmente por la **compactación estática de una sola tongada mediante el pistón hidráulico de la máquina universal de ensayos.**

La compactación estática realizada es similar a la empleada en la fabricación de BTC (Bloque de Tierra Comprimida), razón por la cual se considera éste un método de compactación válido. Sin embargo, se debe tener en cuenta que al tratarse de compactación estática se está eliminando el efecto dinámico que produce el golpeo del pisón sobre la tierra que podría ayudar a recolocar las partículas y obtener una mayor densidad. En los casos observados en el laboratorio la vibración de la tierra permite mayores movimientos relativos entre las partículas y por tanto mayor facilidad para el relleno de los huecos.

Se intentó fabricar varias probetas de prueba de dimensiones 100x100x200 mm introduciendo en el molde 4,752 kg de tierra sin embargo no se consiguió alcanzar compactar la tierra hasta las dimensiones deseadas, el molde presentó una grieta y las fuerzas alcanzadas por la máquina universal de ensayo rondaban los 46 kN, valor que está muy cerca de la carga máxima soportada por la máquina de 50 kN.

Mediante prueba y error se consiguieron fabricar probetas de las dimensiones deseadas de 200 mm de altura introduciendo una masa de tierra de 4,490 kg, lo que realizando los cálculos se traduce en una densidad seca de las probetas de  $2,126 \text{ g/cm}^3$ . **Este es el valor más próximo posible a la densidad de próctor que se pudo conseguir con los moldes y la máquina disponibles y es la densidad objetivo con las que se fabricaron todas las probetas.**

## 6.2 Descripción y fabricación de los moldes y pisones

Para la elaboración de los tres tipos de probetas utilizadas en los posteriores ensayos se utilizaron tres tipos de moldes distintos.

Las probetas cilíndricas se compactaron en moldes cilíndricos de acero de 100 mm de diámetro de los que se disponía en el laboratorio de antemano, estos moldes también se habían utilizado previamente en la fabricación de probetas de hormigón.

En cambio, para las probetas prismáticas de 100x100x200mm y 100x450x100mm se construyeron moldes a medida con madera de encofrado. Las dimensiones interiores de los moldes prismáticos se designarán en función de su base, dado que están abiertos por arriba. La altura de los moldes es la suficiente para que quepa la tierra sin compactar y el pisón.

Se construyeron dos moldes para las probetas de 100x100x200mm y un molde para las de 100x450x100mm.

Los moldes de madera son desmontables para facilitar el desmoldado de las probetas, y están constituidos por seis piezas sujetas con varillas roscadas.

Las piezas correspondientes a los moldes 100x100x200mm se ven en la figura siguiente:



Ilustración 23: Molde para probetas de 100x200x100 mm

Las piezas numeradas son:

**1-** Base: situada en el fondo del molde, sobre ella reposa la probeta una vez fabricada para facilitar su transporte.

**2-** Sub-base: sobre ella se asientan el resto de piezas del molde para favorecer el alineamiento y facilitar el transporte.

**3 y 4** - Paredes verticales con listones de madera en los extremos: Los listones de madera hacen de tope sobre los que se apoyan las piezas 5 y 6. En los bordes laterales de estas piezas están los orificios por los que pasan las varillas roscadas que aportan la rigidez al molde

**5 y 6** - Paredes verticales: su posición está delimitada entre la base y los listones de las piezas 3 y 4.

En cuanto al molde para las probetas destinadas a flexión de dimensiones 100x450x100mm, el número de piezas y el montaje es el mismo, la única diferencia radica en las dimensiones como se puede ver a continuación.



Ilustración 24: Molde para probetas de 100x450x100mm

Para la fabricación de los pisones utilizados para la compactación de las probetas prismáticas se cortaron dos trozos de 100 mm y un trozo de 450 mm de una viga de acero con un perfil HEB 100.

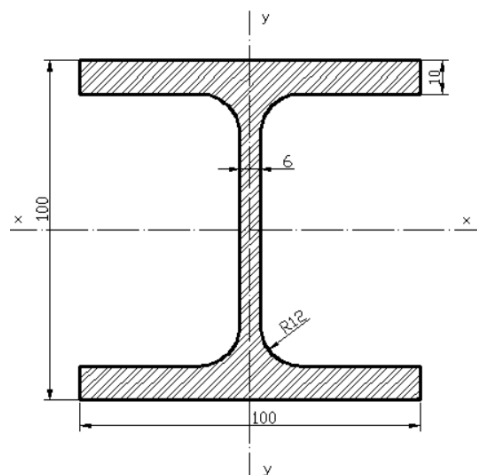


Ilustración 25: Perfil HEB 100 utilizado para los pisones, cotas en milímetros

De forma que se confeccionaron dos pisones de 100 mm de longitud y un pisón de 450mm de longitud.

La superficie utilizada para compactar la tierra es la cara plana exterior del ala inferior, en el exterior del ala superior se aplica la carga y el ala inferior es la que compacta.

Las dimensiones de los perfiles se calcularon para que la holgura con la que estos pisones encajan en sus respectivos moldes fuera de 1mm por cada cara. Una holgura pequeña que favorece la compactación uniforme puesto que cubre casi a la totalidad la sección interna del molde y que a su vez permite que el pisón permanezca alineado en todo momento.

Para la compactación de las probetas cilíndricas se empleó un útil de la máquina universal de ensayos. Un pisón, constituido por un disco metálico y un mango para su sujeción a la mordaza, que encajaba en los moldes cilíndricos con una holgura de 1 mm en su contorno.

### 6.2.1 Descripción geométrica

La fabricación de los moldes la llevó a cabo un miembro de la asociación Taph Taph, se fabricaron dos moldes de madera de encofrado, con unas dimensiones interiores en su base de 100x100mm y un molde de dimensiones internas en la base 100x450mm.

Tras la recepción de los moldes en el laboratorio, se llevó a cabo la puesta a punto de los mismos. Los moldes que se recibieron diferían un poco de las medidas nominales a las que se apuntó en primer momento, además presentaban algunos problemas de ajuste.

La solución a estos defectos fue el reajuste por medio de lijado de las superficies recrecidas y la adición láminas de madera en los puntos donde era necesario aumentar la longitud del molde.

Tras estos ajustes las dimensiones de la base del molde para las probetas prismáticas del ensayo de flexión a tres puntos pasó a medir 104x450mm. Este cambio fue debido a problemas con el ajuste del pisón dentro del molde puesto que era demasiado grande. Ante la decisión de reducir el pisón o aumentar las dimensiones del molde, se optó por aumentar las dimensiones del molde por ser la madera más fácil de trabajar.

Las probetas utilizadas para los ensayos de flexión tendrán, en consecuencia, dimensiones en su base de aproximadamente 104x450mm, siendo estas dimensiones producto de un redimensionado del molde y no un error en la fabricación.

La campaña experimental contempla el ensayo de tres tipos de probetas:

- **Prismáticas de 100x100x200 mm:**

Se fabricaron con los moldes de madera de sus mismas dimensiones compactando la tierra en la dirección vertical utilizando el actuador hidráulico de la máquina universal de ensayos.

Se fabricaron 10 probetas de prueba para la puesta a punto del procedimiento y posteriormente 20 probetas finales destinadas a los ensayos de compresión simple y tracción indirecta.

La nomenclatura utilizada para dichas probetas es PX, indicando P como Prismática y X el número de la probeta en cuestión, quedando las probetas denominadas desde P1 a P20. Para las probetas de prueba se utilizó el código PPX, donde PP responde a Prueba Prismática y X al número de probeta.

- **Prismáticas de 100x450x100:**

Se fabricaron en el molde de madera de sus mismas dimensiones y debido a su mayor tamaño se compactaron utilizando el actuador hidráulico del pórtico de carga del laboratorio, puesto que la fuerza máxima aplicable por la máquina universal de ensayos es de 50 kN y para dichas probetas se requiere en torno a los 100 kN.

Se fabricaron 4 probetas de prueba denominadas PFX (Prueba Flexión X, siendo X el número de la probeta) y 8 probetas finales denominadas FX (Flexión X, siendo X el número de la probeta). Dichas probetas se destinaron al ensayo de flexión a tres puntos.

- **Cilíndricas de 100mm de diámetro y 113 mm de altura:**

Se fabricaron en los moldes metálicos disponibles en el laboratorio, usualmente utilizados para la fabricación de probetas de hormigón, aplicando la carga a través de la máquina universal de ensayos.

Se fabricaron 3 probetas de prueba denominadas CPX (Cilíndrica Prueba X, siendo X el número de probeta) y 11 probetas definitivas denominadas por CX siguiendo el mismo criterio donde la C responde a Cilíndrica.

### 6.2.2 Descripción de uniones y refuerzos

Tras la puesta a punto de los moldes anteriormente descritos se pasó a la compactación de algunas probetas de prueba con el objetivo de determinar la fuerza necesaria para la compactación de la tierra hasta las dimensiones deseadas. El control del ensayo se realizó en desplazamientos y la posición final del actuador se calculó de tal manera que el recorrido del actuador terminara una vez que la tierra compactada dentro del molde tuviera una altura de 200mm.

La fuerza, de carácter creciente, aplicada por el actuador hidráulico de la máquina universal de ensayos para la compactación de la tierra dentro del molde alcanzó un valor máximo de aproximadamente 37 kN para estas primeras probetas de prueba.

Como resultado de la aplicación de esas fuerzas tan elevadas sobre los moldes, se oyeron en varias ocasiones crujidos de la madera y apareció una grieta en uno de los moldes de las probetas de 100x100x200mm situada junto al orificio por el que pasaba una de las varillas de sujeción.

Dicha grieta, recta de unos 3 cm y vertical, era apreciable solamente ante los esfuerzos soportados durante la compactación. Su localización se muestra en la siguiente figura, como medio de advertencia y precaución en caso de utilizar moldes de madera de características similares.



Ilustración 26: Localización de la grieta

Se dedujo que dicha grieta pudo ser originada por una mezcla de tracción dada su forma vertical y flexión dado que presentaba un escalonamiento en su superficie. No se descarta aún así que la grieta fuera provocada por un fallo previo en el material utilizado, sin embargo como medida preventiva se reforzaron los moldes restantes antes de continuar las pruebas.



La solución adoptada para mantener la integridad de los moldes fue reforzar las piezas 3 y 4 con dos listones transversales encolados y con orificios para introducir las varillas, aumentando la rigidez a flexión. Además se fabricaron dos refuerzos desmontables con pletinas de acero y varillas roscadas para aumentar la rigidez a tracción.

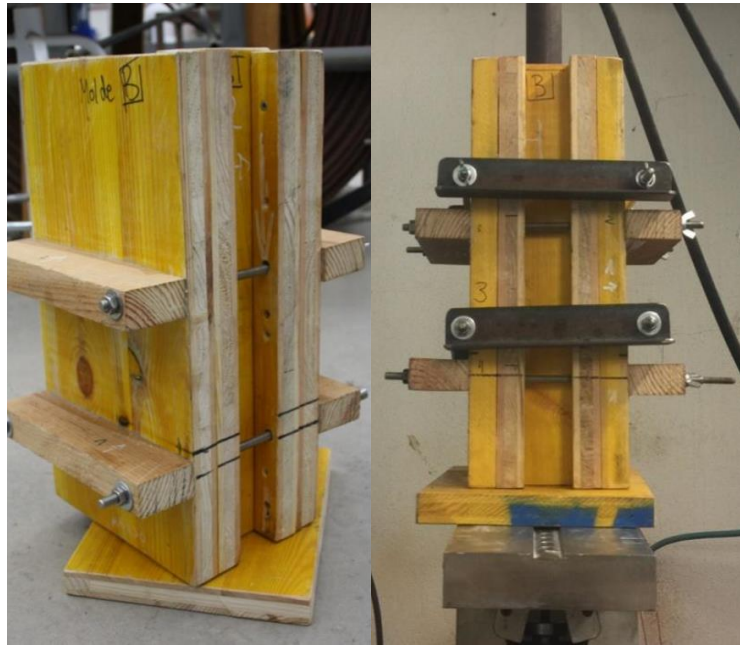


Ilustración 27: Refuerzos con listones de madera

Ilustración 28: Molde final, con refuerzos metálicos desmontables

Las moldes reforzados no presentaron nuevas grietas y soportaron las cargas a las que se sometieron durante la fabricación de las probetas, sin embargo, aumentó el tiempo necesario para el montaje de los moldes y el desmoldado de las probetas debido a los refuerzos añadidos.

### 6.3 Procedimiento de fabricación de las probetas

En el siguiente subapartado se recoge el procedimiento para la fabricación de los distintos tipos de probetas, incluyendo la preparación de la tierra, el montaje de los moldes, el desmoldado y el curado.

#### 6.3.1 Medida de humedad previa y adición de agua

Para conseguir una mezcla con la humedad óptima del 5,6% obtenida como resultado del ensayo Próctor se determinó la humedad de partida de la tierra y se le añadió agua hasta alcanzar dicha humedad óptima.

Se determinó la humedad de la tierra de partida durante varios días antes de la fabricación de las probetas, para ello se tomaron muestras de unos 2 kg con suficiente tierra como para tener valores representativos. Dichas muestras de tierra fueron puestas en bandejas, secadas en estufa a 110° C durante 24 h y pesadas antes y después para determinar la pérdida de masa. Este procedimiento se realizó de acuerdo a la norma UNE 103-300 y la humedad obtenida para la tierra en contacto con el ambiente fue de en torno al 1,03% para todas las muestras y con una variación despreciable.

Como alternativa para la medida de la humedad se empleó el secado de la tierra mediante hornillo eléctrico y sartén. Se calienta la tierra en la sartén, a la tierra se le añade además alcohol de quemar y se le prende fuego para aumentar la temperatura de la tierra en toda su superficie.

Éste método se empleó para acelerar los resultados que de otra forma toman 24 h, toma unos 15 minutos y sirve para tener una aproximación de la humedad de la tierra.

Los resultados obtenidos de la humedad por este procedimiento fueron similares a los obtenidos por secado en estufa, sin embargo se optó por descartar este método debido a que la temperatura alcanzada superaba los 110°C que es la temperatura máxima para el secado de tierras arcillosas según la norma UNE 103-300. Además, durante la quema del alcohol se apreciaba una nube polvorienta ascendente que podría contener aerosoles procedentes de la tierra y disminuir así la masa de la muestra.

Una vez determinada la humedad de la tierra de partida, en este caso del 1,03%, se estableció que debía añadirse un 4,6% sobre la masa seca de agua adicional. Para ello, si se parte de una cantidad de tierra con una humedad previa, es necesario calcular su masa seca y posteriormente calcular el 4,6 % sobre esa masa seca.

Se llenaron cubos, previamente tarados, con unos 25 kg de tierra de los cuales restando el 1% de humedad quedaban 24,752 kg de masa seca. La cantidad de agua a añadir rondaba por tanto los 1,139 kg de agua, puesto que la densidad del agua de grifo es aproximadamente 1 kg/L en las condiciones del laboratorio a 1 atm y 20°C se decidió medir la cantidad de agua en volumen con un vaso de precipitado.

De este modo, a cada cubo de tierra se le añadía 1,139 L de agua de corriente.

### 6.3.2 Mezclado

El proceso de mezclado se realizó por medios mecánicos utilizando una hormigonera de obra común. En dicha hormigonera se introducía la tierra y se añadía el agua correspondiente de forma lenta y progresiva para intentar conseguir una mezcla lo más homogénea posible. Una vez añadida toda el agua se dejaba girando la hormigonera unos 3 minutos, tras lo cual se vertía la tierra de la hormigonera en cubos.

Tras el mezclado, la tierra se pesaba y se dejaba reposar durante 24 h en cubos tapados herméticamente para asegurar que el agua estaba asimilada completamente por las arcillas.

Los cubos que habían sido tapados herméticamente perdían en torno a 5 g de masa al día debido a la evaporación, esta pequeña diferencia se corregía antes de la fabricación de las probetas añadiendo la masa de agua restante y removiendo con una cuchara de jardinería.

### 6.3.3 Medida de humedad con TDR y medida de humedad tras secado en horno

La medida de la humedad se llevó a cabo justo antes de la fabricación de las probetas, para ello se utilizó el sensor de humedad TDR y además se tomaron muestras de unos 2 kg de cada cubo para el secado en estufa.



Los datos referentes a la humedad de la tierra contenida en cada cubo medida mediante secado en horno se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 3: Humedad medida mediante secado en horno, [1].

Probeta	Cubo	Humedad	Probeta	Cubo	Humedad
PP1	1	6,309%	P6	3	5,3128%
PP2			P7		
PP3			P8		
PP4			P9		
PP5			P10		
PP6	2	5,182%	P11	4	5,1936%
PP7			P12		
PP8			P13		
PP9			P14		
P1	5		P15	6	4,9144%
P2			P16		
P3			P17		
P4			P18		
P5			P19		
			P20		
Probeta	Cubo	Humedad	Probeta	Cubo	Humedad
CP1	6	4,9144%	PF1	8	5,4119%
CP2	7	4,876%	PF2		
C1			PF3		
C2			PF4		
C3			PF5		
C4			F1	10	5,218%
C5			F2	11	5,1986%
C6			F3		
C7	F4	12	5,316%		
C8	F5				
C9	F6	13	4,939%		
C10	F7				
C11	F8				

Debido a un error, los datos referentes al cubo 5 se perdieron durante el proceso.

Se valoró la posibilidad de medir la humedad de cada probeta introduciendo las varillas del TDR dentro del molde, sin embargo, el volumen de muestra de la tierra contenida dentro del molde era demasiado pequeño y las mediciones presentaban desviación. El sensor ofrecía valores diferentes de la humedad para la misma tierra en función de si se encontraba en un recipiente o en otro.

Tras la aclaración sobre la posible desviación de la medida de humedad mediante TDR se ofrecen los resultados obtenidos:

Tabla 4: Medida de humedad mediante la calibración de FieldScout TDR-150, [1].

Probeta	Humedad	Probeta	Humedad	Probeta	Humedad	Probeta	Humedad
PP1	2,01%	P6	0,95%	CP1		PF1	4,67%
PP2	1,09%	P7	2,43%	CP2	4,060%	PF2	4,67%
PP3	1,12%	P8	3,42%	C1	4,250%	PF3	4,67%
PP4	2,15%	P9	3,29%	C2	3,874%	PF4	3,19%
PP5	2,03%	P10	3,42%	C3	3,995%	PF5	3,19%
PP6	1,77%	P11	2,58%	C4	2,806%	F1	3,07%
PP7	1,52%	P12	3,07%	C5	3,423%	F2	1,50%
PP8	0,46%	P13	2,66%	C6	3,139%	F3	3,36%
PP9	1,08%	P14	2,96%	C7	3,322%	F4	2,95%
P1	0,66%	P15	2,31%	C8	2,257%	F5	3,10%
P2	0,35%	P16	3,28%	C9	2,257%	F6	3,24%
P3	0,50%	P17	3,35%	C10	3,571%	F7	3,87%
P4	0,53%	P18	3,34%	C11	3,647%	F8	3,87%
P5	1,04%	P19	3,28%				
		P20	3,12%				

Se puede observar que los datos recogidos en las dos tablas son los mismos que los que aparecen en el TFG complementario a este, *Caracterización del comportamiento a compresión simple sobre probetas de tapia* [1].

#### 6.3.4 Compactación estática con actuador hidráulico con densidad objetivo igual a la de próctor

Para la compactación de las probetas prismáticas de 100x100x200mm y las cilíndricas se utilizó una máquina universal de ensayos de la compañía Servosis capaz de aplicar una fuerza en su actuador de hasta 50 kN.



Ilustración 29: Máquina universal de ensayos Servosis

Para la compactación de las probetas destinadas a flexión se utilizó un pórtico de carga de la marca Servosis con una célula de carga de una capacidad de 20 toneladas y un recorrido de carrera de 300mm.



Ilustración 30: Pórtico de carga Servosis

El control de la compactación se llevó a cabo a través de dos tipos de software adicional llamados *PCD2K* y *TD2K* instalados en un ordenador conectado a la máquina universal de ensayos. Se trata de software de adquisición de datos en tiempo real proporcionado por Servosis y que se puede encontrar en la dirección web <https://www.servosis.com/software>. Se realizó un control en desplazamiento, obteniéndose en el punto final del recorrido la altura deseada para cada tipo de probeta.

El recorrido del actuador hidráulico se dividió en dos tramos cada uno con velocidades diferentes, un tramo inicial a mayor velocidad, y un tramo a velocidad reducida a medida que la fuerza aumenta.

Por ejemplo, para las probetas prismáticas de 100x100x200 mm se tiene:

**Tramo 1:** este tramo comprende la compactación de la tierra en los primeros **95 mm a una velocidad de 60 mm/min.**

**Tramo 2:** es el último tramo del recorrido de unos **30 mm que se realiza a una velocidad reducida de 25 mm/min** puesto que las fuerzas en ese tramo crecen exponencialmente y se podrían producir desperfectos en el molde a velocidades mayores.

El recorrido completo por tanto es de unos 125 mm, distancia que varía ligeramente de una probeta a otra.

Para las probetas cilíndricas y las probetas prismáticas de 100x450x100mm se siguió un procedimiento análogo con dos tramos de carga.

Solamente para la probeta prismática P17 se realizó el control en carga, con destino final para la carga de 42 kN, el mismo valor aproximadamente que el obtenido para las probetas fabricadas con control en desplazamiento. Las dimensiones obtenidas para esta probeta fueron las deseadas, lo que se puede tomar como un indicio de que este método de control puede ofrecer buenos resultados.

La máquina universal de ensayos consta de un sensor que mide la fuerza aplicada en el actuador además de un sensor que mide la posición del pistón del actuador.

Con la ayuda del software de control se puede obtener la pareja de vectores posición del actuador y fuerza aplicada que se almacena en un archivo de extensión .txt o .pct y se muestra de la siguiente manera:

```
Samples;1068;
Tiempo (s);213,6000;
Tiempo;Fuerza;Posición;Día;Hora;
s;kN;mm;
,00000;+00,000;-000,01;19/01/2002;23:24:14;
,20000;+00,000;-000,01;19/01/2002;23:24:14;
,40000;+00,000;-000,01;19/01/2002;23:24:14;
,60000;+00,000;-000,01;19/01/2002;23:24:14;
,80000;+00,073;+000,12;19/01/2002;23:24:15;
1,00000;+00,096;+000,32;19/01/2002;23:24:15;
1,20000;+00,107;+000,51;19/01/2002;23:24:15;
1,40000;+00,111;+000,71;19/01/2002;23:24:15;
1,60000;+00,117;+000,92;19/01/2002;23:24:15;
1,80000;+00,121;+001,12;19/01/2002;23:24:16;
2,00000;+00,125;+001,32;19/01/2002;23:24:16;
2,20000;+00,128;+001,51;19/01/2002;23:24:16;
```

Ilustración 31: Ejemplo de datos devueltos por el software trazador

### 6.3.5 Medida de energía de compactación

El hecho de que la compactación de la tierra se haya realizado mediante compactación estática utilizando la máquina universal de ensayos facilita el cálculo preciso de la energía de compactación de cada probeta. En el caso de la fabricación de probetas de forma manual sería imposible saber la cantidad de energía aportada a la tierra de forma exacta.

Los archivos .txt devueltos por el software de control se pueden importar al software de cálculo matricial *MatLab* en forma de vectores y se puede representar la fuerza del actuador frente a la posición de este.

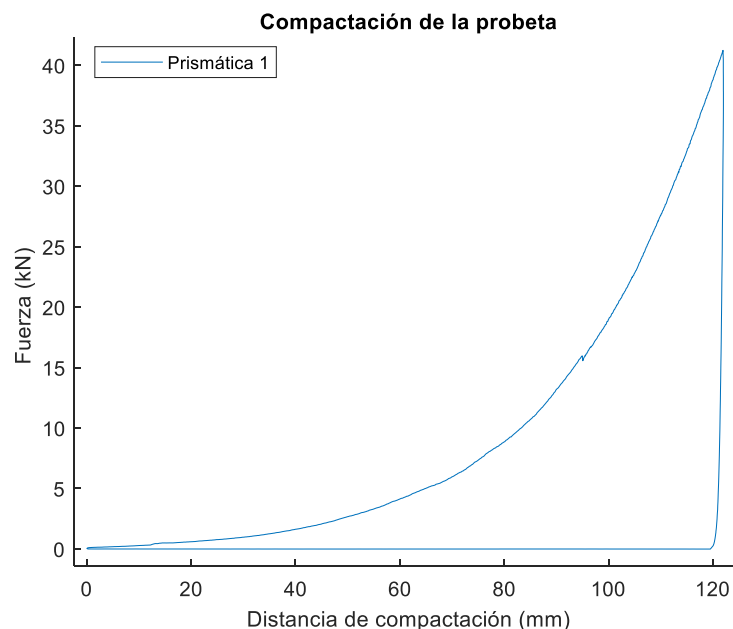


Ilustración 32: Ejemplo de compactación de la probeta prismática 1

En la ilustración se puede observar un tramo de carga monótonamente creciente y un tramo de descarga que corresponde al trayecto de vuelta del actuador sin carga una vez compactada la tierra.

El tramo de descarga no es relevante para la energía y se ha eliminado en las representaciones siguientes por claridad.

Dicha curva sin el tramo de descarga se puede integrar en *MatLab* utilizando el comando *trapz(X,Y)* que integra por el método de los trapecios el área contenida bajo la representación *Y* vs *X*. Ambos vectores deben ser de la misma longitud.

Al integrar el área bajo la curva de la representación Fuerza vs Posición del actuador se puede obtener la energía aplicada a la tierra para su compactación en *J* realizando las conversiones necesarias para pasar los vectores fuerza y desplazamiento a unidades del Sistema Internacional.

Un ejemplo de las líneas de programación utilizadas para el cálculo de dicha energía se muestra a continuación:

```
Energia_compactacion=trapz(Posicion(1:n_max),Fuerza(1:n_max));
```

Donde se calcula el trabajo realizado por el actuador desde la posición inicial hasta el comienzo del tramo de descarga que comienza a partir de la componente *n\_max* que debe ser determinada con anterioridad.

### 6.3.6 Resultados de la compactación

Como resultado de la compactación de las probetas se obtienen las figuras y tablas mostradas a continuación que se separarán según tipo de probeta.

Se realizaron mediciones de las probetas con la ayuda de una regla graduada y un pie de rey, los valores que se muestran en las tablas son la media de tres mediciones tomadas en cada dirección.

La energía de compactación es el resultado de la integración de la fuerza por el desplazamiento a lo largo de la curva de compactación, observando las gráficas mostradas a continuación de fuerza frente a desplazamiento se observa un comportamiento creciente de la fuerza y por tanto la energía dependerá en mayor medida de la fuerza que de la distancia compactada.

Dividiendo la energía de compactación (*J*) entre el volumen de cada probeta ( $m^3$ ) se puede calcular la energía por unidad de volumen ( $J/m^3$ ) que se le ha aportado a cada probeta durante su compactación, esta se comparará con la energía por unidad de volumen del ensayo proctor como comparación. El volumen calculado corresponde a las dimensiones húmedas, al igual que en el ensayo proctor, y no se tiene en cuenta la posible retracción de las probetas que en apartados posteriores se observará que dicha retracción es casi nula.

### 6.3.6.1 Probetas prismáticas 200x100x100 mm

Tabla 5: Datos tras compactación de probetas prismáticas 200x100x100mm

Referencia probeta	Fecha de fabricación (dd/mm/aa)	Dimensiones de la probeta húmeda (mm)	Fuerza máxima (kN)	Energía de compactación (J)	Energía por unidad de volumen (J/m <sup>3</sup> )
P1	14/05/2018	100x100x203	41,238	1109,10502	546357,1527
P2	14/05/2018	100x100x201	43,571	1182,147405	588133,0373
P3	14/05/2018	100x100x201	43,316	1112,820455	553642,0174
P4	14/05/2018	100x100x201	43,699	1136,816695	565580,4453
P5	14/05/2018	100x100x201	37,422	959,25061	477239,1095
P6	14/05/2018	100x100x202	43,971	1154,55104	571559,9208
P7	14/05/2018	100x100x202	34,5	819,87122	405876,8416
P8	16/05/2018	100x100x203	27,122	659,633935	324942,8251
P9	16/05/2018	100x102x202	30,932	768,22089	372850,364
P10	16/05/2018	101x104x196	42,424	1042,721535	506474,4699
P11	16/05/2018	100x102x199	39,937	979,60146	482609,8433
P12	16/05/2018	100,7x102,83x201	43,2	1119,307485	537779,2538
P13	16/05/2018	103,8x100,62x202	42,497	1102,751715	522690,6193
P14	16/05/2018	103,8x100,9x201	43,06	1073,008655	509704,7113
P15	16/05/2018	104x101,4x201	38,5	953,124485	449657,9484
P16	16/05/2018	100,8x104,1x201	43,4	1093,249465	518336,694
P17	17/05/2018	104,16x101,31x197	42,018	1143,85898	550241,0323
P18	17/05/2018	103,75x101x202	32,582	845,116125	399259,7584
P19	17/05/2018	104,35x101,56x200	40	1036,210095	488880,4581
P20	17/05/2018	101x102x201	39,781	999,07173	482479,7243

Revisando con detenimiento los valores de la tabla se puede observar que para valores similares de la fuerza máxima alcanzada por el actuador durante la compactación le corresponden valores similares de la energía.

6.3.6.1.1 Fuerza de compactación Vs Distancia compactada

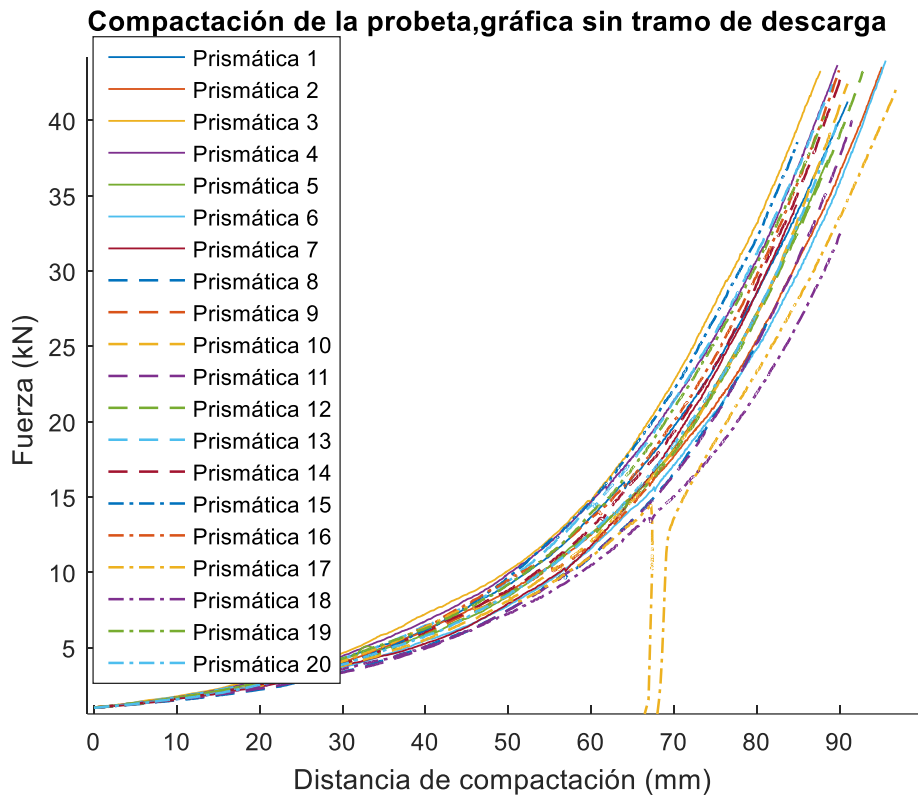


Ilustración 33: Curvas de compactación de probetas prismáticas 200x100x100mm

Se observa que las pendientes de las curvas de compactación son muy similares y que el área comprendida bajo dos curvas que alcancen el mismo valor de fuerza máxima es también muy parecida.

Especial mención a la curva correspondiente a la probeta prismática 17, en la que se paró la compactación para comprobar que el molde estaba correctamente montado, por ello el tramo de descarga.

6.3.6.1.2 Energía compactación

A continuación se muestra la energía por unidad de volumen aplicada durante la compactación.

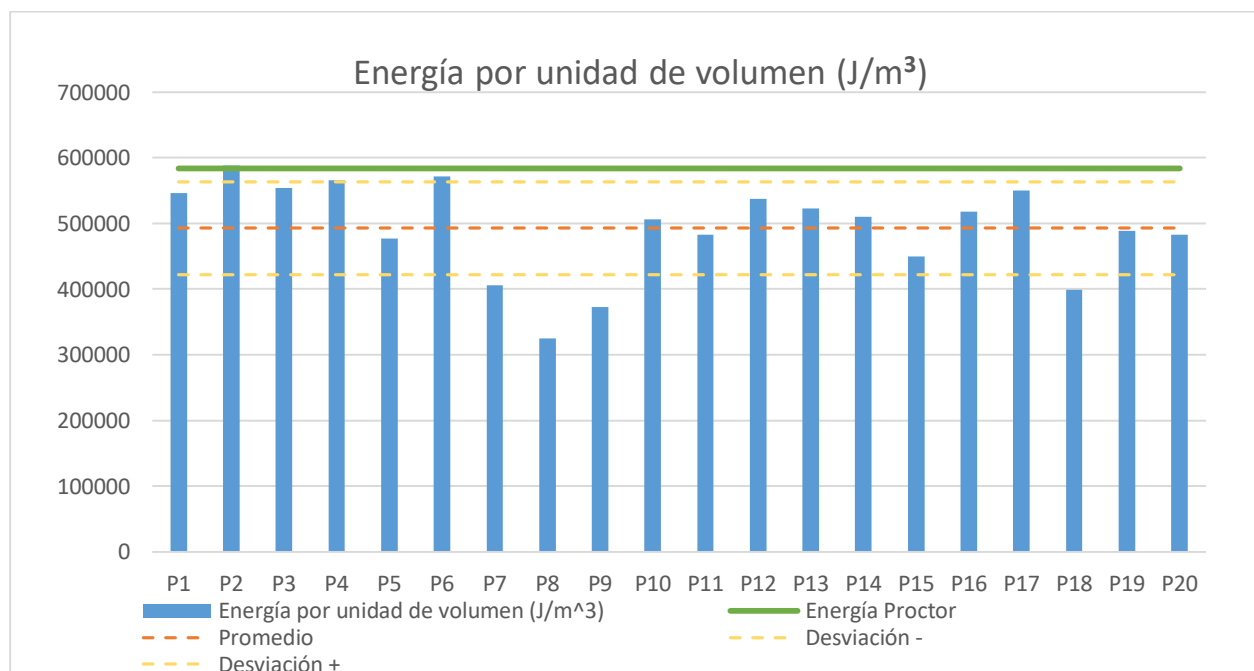


Ilustración 34: Energía de compactación por unidad de volumen de probetas prismáticas 100x100x200 mm

Se obtiene un promedio de  $492714,8113 \text{ J/m}^3$  y una desviación típica del  $14,4038539 \%$ .

Al tenerse como objetivo una densidad seca de  $2,126 \text{ g/cm}^3$ , un valor inferior a la densidad del ensayo proctor, es lógico esperar valores de energía inferiores a los aportados durante el ensayo próctor.

### 6.3.6.2 Probetas prismáticas 450x100x100 mm

En la siguiente tabla se recogen los resultados de la compactación de las probetas prismáticas destinadas al ensayo a flexión a tres puntos, estas probetas se compactaron utilizando el pórtico de carga del laboratorio.

Tabla 6: Datos tras compactación de probetas prismáticas 450x100x100mm

Referencia probeta	Fecha de fabricación (dd/mm/aa)	Dimensiones de la probeta húmeda (mm)	Fuerza máx (kN)	Energía de compactación (J)	Energía por unidad de volumen ( $\text{J/m}^3$ )
F1	24/05/2018	450x105,7x103	96,66	1276,5978	260572,9717
F2	24/05/2018	450x105,5x103	96,22	1204,3448	246291,0576
F3	25/05/2018	450x104,5x105,05	98,32	1352,05335	273696,326
F4	25/05/2018	450x104,2x103,9	97,07	1290,81095	264951,7916
F5	25/05/2018	450x104,5x104,55	101,06	1306,1465	265667,8797
F6	25/05/2018	450x104,7x104,6	97,55	1247,25045	253082,8925
F7	29/05/2018	450x104,93x104,04	116,48	1562,40745	318040,0192
F8	29/05/2018	450x105x104	115,88	1502,04245	305665,9442

#### 6.3.6.2.1 Fuerza de compactación Vs Distancia compactada

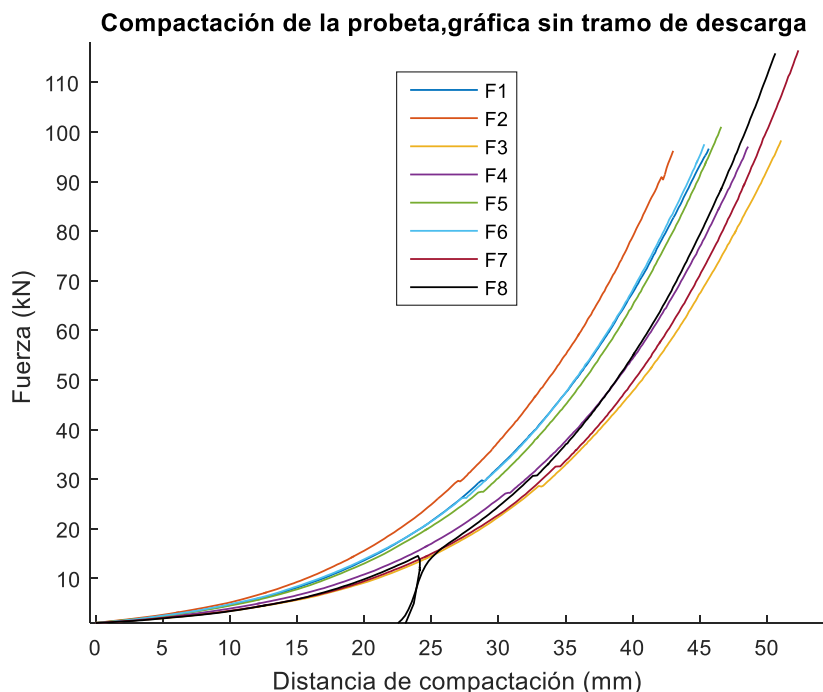


Ilustración 35: Curvas de compactación de probetas prismáticas 450x100x100mm

Se observa como para este tipo de probetas el recorrido del pisón es menor y la fuerza necesaria es mayor que en las probetas de  $100 \times 100 \times 200 \text{ mm}$ .

La descarga que se aprecia en la curva correspondiente a la probeta F8 se debe a una pausa en la compactación para comprobar que el pisón estaba completamente horizontal.



### 6.3.6.2 Energía de compactación

En el siguiente diagrama se recoge la energía aplicada a las probetas destinadas al ensayo de flexión.

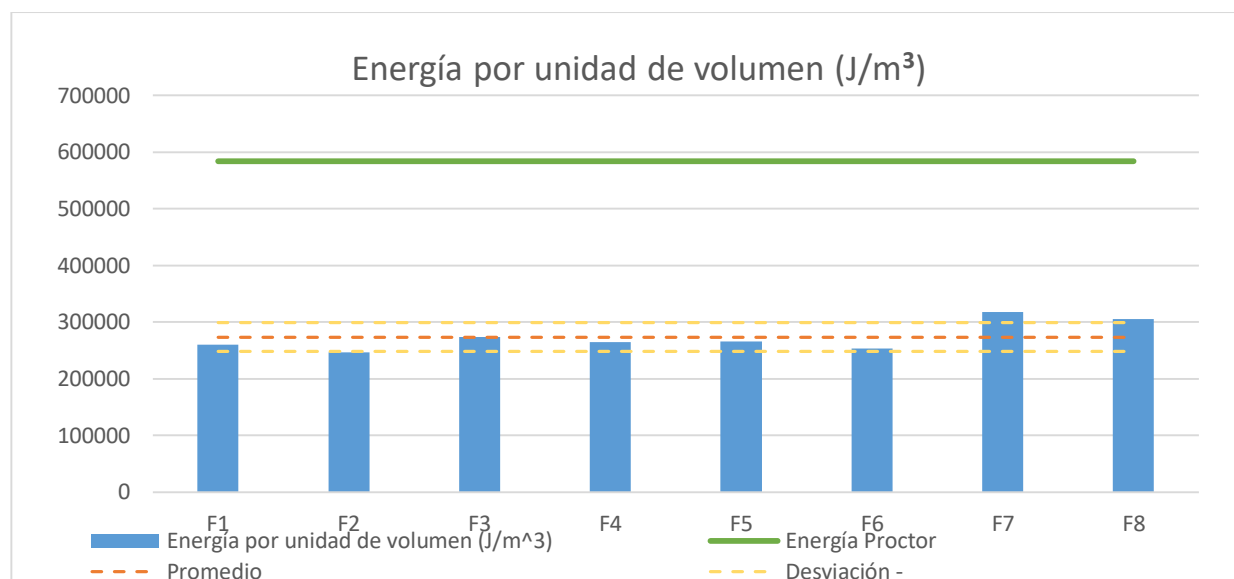


Ilustración 36: Energía de compactación, probetas de flexión

El promedio de la energía aplicada es de 273496,1103 J/m<sup>3</sup> con una desviación típica del 9,247054 %.

Se observa que la energía aplicada por unidad de volumen a las probetas es muy inferior a la aplicada durante el ensayo próctor. El objetivo era obtener probetas con un volumen medio de 4,5 dm<sup>3</sup> sin embargo se obtuvo un volumen medio de 5,006 dm<sup>3</sup>, lo que indica un déficit en la energía aplicada. En caso de haberse conseguido las dimensiones deseadas de 4,5 dm<sup>3</sup> la energía por unidad de volumen sería mayor.

Por otra parte, debido a que la densidad objetivo de 2,126 g/cm<sup>3</sup> es menor que la del ensayo próctor de 2,25 g/cm<sup>3</sup> cabe esperar que la energía también sea menor.

### 6.3.6.3 Probetas cilíndricas

En la tabla mostrada a continuación se recogen las características de las probetas cilíndricas tras su fabricación. Las dimensiones se denotan con una H para designar la altura y una D para designar el diámetro de las probetas.

Tabla 7: Datos tras compactación de probetas cilíndricas

Referencia probeta	Fecha de fabricación (dd/mm/aa)	Dimensiones de la probeta húmeda (mm)	Fuerza máxima (kN)	Energía de compactación (J)	Energía por unidad de volumen (J/m <sup>3</sup> )
C1	18/05/2018	H=114 D=101	23,888	252,315575	276252,7305
C2	18/05/2018	H=115 D=101	26,662	284,9836	309306,7509
C3	18/05/2018	H= 113 D=102	33,099	343,193	371680,4795
C4	18/05/2018	H=113 D=101,5	30,631	321,8132	351968,2141
C5	18/05/2018	H=113 D=102	34,433	369,080395	399716,7139
C6	18/05/2018	H=113 D=101,5	32,186	343,44167	375623,3468
C7	18/05/2018	H=113 D=102	35,081	372,802155	403747,4066
C8	18/05/2018	H=113 D=101,25	31,05	324,610195	356782,6829
C9	18/05/2018	H=113 D=102,3	32,559	337,248795	363103,817
C10	18/05/2018	H=112 D=102,05	39,784	410,50646	448111,4837
C11	18/05/2018	H=113 D=102	37,855	406,69238	440450,7633

Se aprecia que valores similares de fuerza máxima implican valores similares de energía.

### 6.3.6.3.1 Fuerza de compactación Vs Distancia compactada

Las curvas representadas en la ilustración siguiente corresponden a las probetas cilíndricas que fueron fabricadas en los moldes metálicos.

Las probetas realizadas en estos moldes metálicos presenta la menor variabilidad en cuando a las curvas de carga se refiere, esto puede ser debido a la mayor rigidez de dichos moldes.

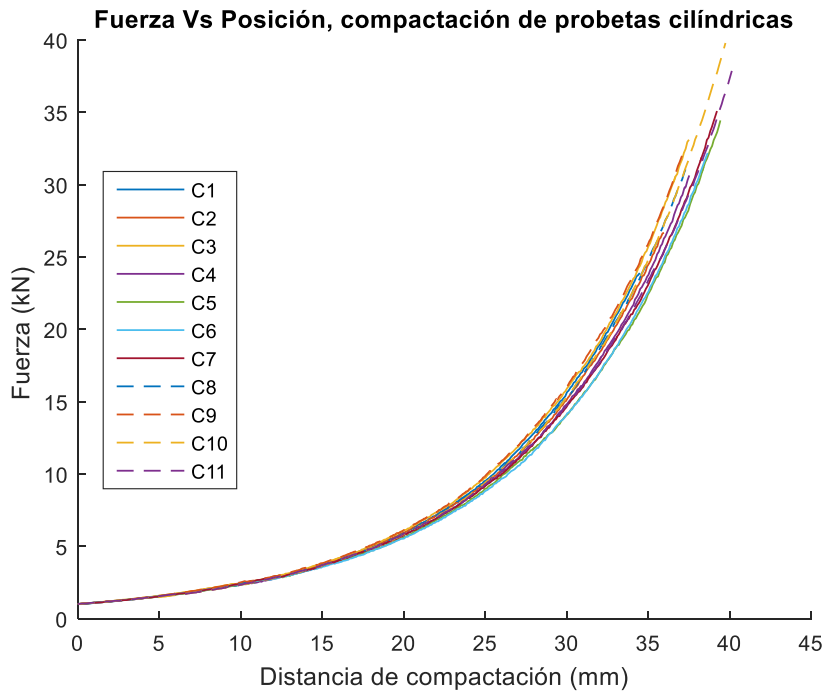


Ilustración 37: Curvas de compactación de probetas cilíndricas

Se observa como las diferentes curvas presentan una pendiente muy similar y que el área encerrada debajo de dos curvas que alcancen el mismo nivel de fuerza máximas es, consecuentemente, aproximadamente el mismo

### 6.3.6.3.2 Energía compactación

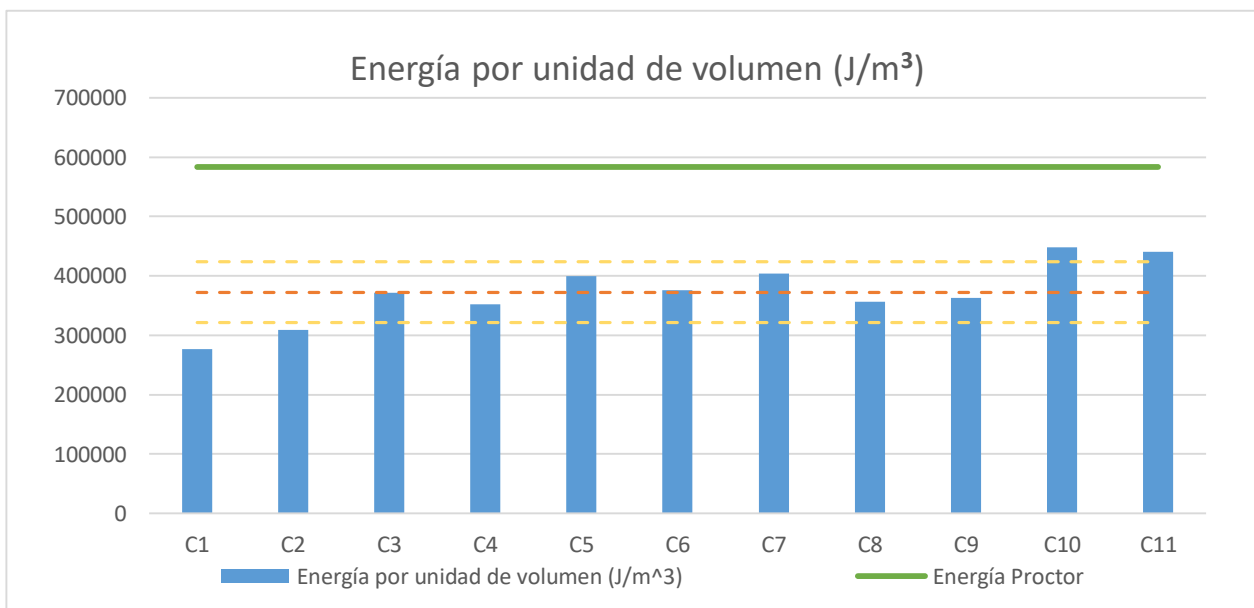


Ilustración 38: Energía de compactación, probetas cilíndricas

La energía promedio aportada a cada probeta es 372431,3081 J/m<sup>3</sup> con una desviación típica del 13,7110918%.

La energía de compactación es inferior a la del ensayo proctor cosa que es de esperar ya que no se alcanzaron los  $2,25 \text{ g/cm}^3$  de densidad seca.

El mayor volumen medio de las probetas también influye en una menor energía por unidad de volumen, se obtuvo un volumen medio de  $0,922904494 \text{ dm}^3$  frente a los  $0,8875 \text{ dm}^3$  para los que fueron diseñadas.

## 6.4 Curado de las probetas

Tras la fabricación y el desmoldado cuidadoso de las probetas, estas fueron transportadas sobre las bases de madera hasta una cámara de curado cerrada herméticamente. La cámara permaneció cerrada durante el curado de las probetas con el objetivo de evitar cambios bruscos en la temperatura y humedad, abriéndose solamente para introducir nuevas probetas.

El tiempo de curado de las probetas se estableció como mínimo en 28 días por similitud con las probetas de hormigón, aunque el tiempo final de curado varía de una probeta a otra y todas las probetas sobrepasaron ese tiempo de curado mínimo.



Ilustración 39: Probetas prismáticas  $100 \times 100 \times 200 \text{ mm}$  y probetas cilíndricas (izquierda) y probetas prismáticas  $100 \times 450 \times 100 \text{ mm}$  (derecha)

En las ilustraciones se pueden ver los diferentes tipos de probetas y su colocación dentro de la cámara de curado.

La humedad de las probetas tras el curado y su posterior ensayo se determinó por el método de secado en horno siguiendo la norma *UNE 103-300* [11].

Los resultados de humedad final junto con la edad de las probetas en el momento del ensayo se recogen en la tabla siguiente:

Tabla 8: Humedad final y edad de probetas

<b>Probeta</b>	<b>Humedad inicial %</b>	<b>Humedad final %</b>	<b>Fecha de fabricación</b>	<b>Fecha de ensayo</b>	<b>Edad de la probeta (días)</b>
P2	5,6	0,53	14/05/2018	21/06/2018	38
P3	5,6	0,957	14/05/2018	21/06/2018	38
P4	5,6	0,538	14/05/2018	21/06/2018	38
P7	5,3128	0,76	14/05/2018	21/06/2018	38
P9	5,3128	0,389	16/05/2018	26/06/2018	41
P14	5,1936	0,599	16/05/2018	26/06/2018	41
P16	5,1936	0,58	16/05/2018	26/06/2018	41
P20	4,9144	0,71	17/05/2018	26/06/2018	40
C1	4,876	0,852	18/05/2018	26/06/2018	39
C2	4,876	0,44	18/05/2018	26/06/2018	39
C6	4,876	1,159	18/05/2018	26/06/2018	39
C7	4,876	0,948	18/05/2018	26/06/2018	39
C8	4,876	0,958	18/05/2018	26/06/2018	39
P1	5,6	0,89	14/05/2018	21/06/2018	38
P6	5,3128	0,563	14/05/2018	21/06/2018	38
P13	5,1936	0,78	16/05/2018	21/06/2018	36
P18	4,9144	0,791	17/05/2018	21/06/2018	35
F2	5,218	0,76838639	24/05/2018	17/07/2018	54
F3	5,1986	0,87719298	25/05/2018	09/07/2018	45
F4	5,1986	0,54819552	25/05/2018	13/07/2018	49
F5	5,316	1,01574403	25/05/2018	09/07/2018	45
F6	5,316	0,68838917	25/05/2018	17/07/2018	53
F7	4,939	0,70285045	29/05/2018	10/07/2018	42
F8	4,939	0,769579	29/05/2018	13/07/2018	45

Los datos recogidos en la tabla son los correspondientes a las probetas utilizadas en los ensayos de tracción indirecta y flexión a tres puntos.

### 6.4.1 Histórico de temperatura y humedad

Se colocó un sensor de humedad y temperatura dentro de la cámara para recopilar medidas durante el proceso de curado.

El histórico de mediciones se muestra a continuación:

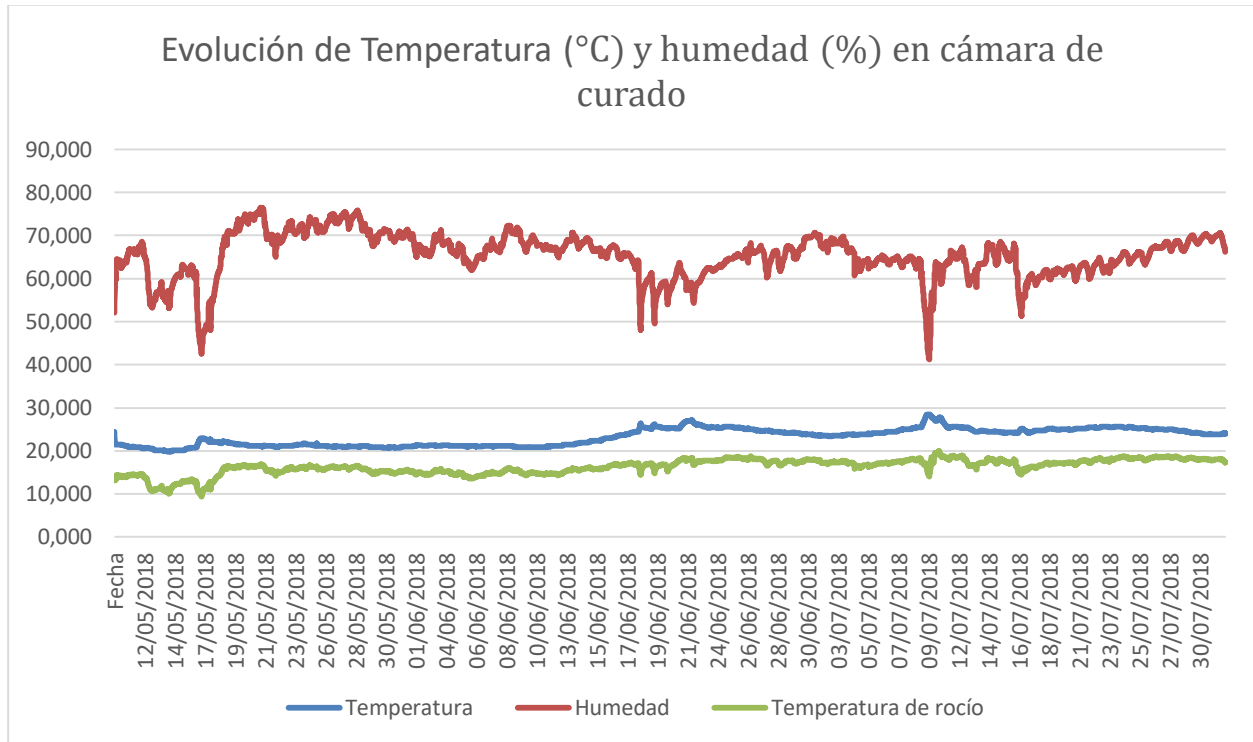


Ilustración 40: Histórico de humedad y temperatura de la cámara de curado

Dentro de la cámara de curado se presentaron unas condiciones estables de temperatura en torno a los 25° C sin variaciones significativas entre el día y la noche durante todo el proceso.

En cuanto a la humedad relativa, se aprecia mayor variación y un valor medio un tanto elevado. Esto puede deberse a que la cámara contenía en su interior un tanque de agua caliente para el curado de probetas de hormigón, una posible fuente de dicha humedad. Las caídas drásticas en la humedad apreciadas en la gráfica podrían ser causadas por la apertura de la cámara y la entrada de aire menos húmedo del exterior.

## 6.5 Cálculo de la densidad de las probetas y geometría final

Tras el curado de las probetas se procedió a la medición de las dimensiones de las probetas, se midieron las tres dimensiones características de las probetas con un pie de rey y una regla metálica graduada.

Dado el acabado superficial rugoso que presentan las probetas de tapia se tomaron varias medidas en cada dirección y se realizó una estimación de la media siendo las variaciones entre medidas del orden de 1 mm.

A partir de las dimensiones de las probetas se puede estimar la densidad de cada probeta en el momento del ensayo y restando la humedad una estimación de la densidad seca.

Para las probetas P1, P2, P3, P4 y P5 fabricadas con la tierra del cubo 5 se supondrá una humedad de fabricación de 5.6% dado que no se disponen de la humedad real.

Tabla 9: Densidad seca de las probetas

Referencia probeta	Masa húmeda (g)	Dimensiones secas (mm)	Humedad de fabricación (%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
P1	4490	103,19x101x203	5,6	2,009682259
P2	4490	100,7x103,09x203	5,6	2,017624648
P3	4490	101,5x104,38x202	5,6	1,986770572
P4	4491	102,54x100,72x202	5,6	2,038537651
P5	4490	103,74x100,89x200	5,6	2,031225132
P6	4491	103,44x101x202	5,3128	2,020694411
P7	4491	100,19x103,14x202	5,3128	2,042956043
P8	4490	100,46x101,98x203	5,3128	2,050033519
P9	4490	103,38x100,03x202	5,3128	2,041018848
P10	4490	101x103x196	5,3128	2,090983046
P11	4490	103,23x101,98x199	5,3128	2,035125378
P12	4490	102,72x102,5x200	5,1936	2,026973875
P13	4490	100,3x103,42x201	5,1936	2,047177497
P14	4490	103x101,92x201	5,1936	2,022853009
P15	4490	102,15x101,52x201	5,1936	2,037584712
P16	4490	102x103,79x201	5,1936	1,995951434
P17	4490	102,41x101,2x198	4,9144	2,075082103
P18	4490	101,72x103,22x202	4,9144	2,007913481
P19	4490	102,88x101,15x200	4,9144	2,04605988
P20	4490	100,8x102,66x201	4,9144	2,047378217
F2	10510	450x104,74x105	5,218	1,999317305
F3	10510	450x106x105	5,1986	1,975916153
F4	10510	450x105,6x104	5,1986	2,002290214
F5	10511	450x105,5x106,5	5,316	1,972093502
F6	10510	450x103,7x105	5,316	2,017489229
F7	10510	450x103,14x107,46	4,939	2,007885322
F8	10510	450x103,3x107,6	4,939	2,000494014
PF1	10102	450x102x104	5,4119	2,007574626
PF2	10102	450x102x104	5,4119	2,007574626
PF3	10102	450x103x105	5,4119	1,950572599
PF4	10102	450x105x106	5,409	1,913471477
C1	2000	H=114 D=102,07	4,876	2,044386096
C2	2000	H=114 D=102,03	4,876	2,045989378
C3	2000	H=113 D=101,53	4,876	2,084064893
C4	2000	H=112 D=101,88	4,876	2,088251742
C5	2000	H=113 D=101,36	4,876	2,091060811
C6	2000	H=113 D=102,3	4,876	2,053214339
C7	2000	H=113 D=102,44	4,876	2,047606108
C8	2000	H=113 D=102,63	4,876	2,040031616
C9	2000	H=112 D=101,94	4,876	2,085794493
C10	2000	H=112 D=102,6	5,4119	2,044991763
C11	2000	H=113 D=101,24	5,4119	2,08536445

Los valores de la densidad se representan en el siguiente diagrama:

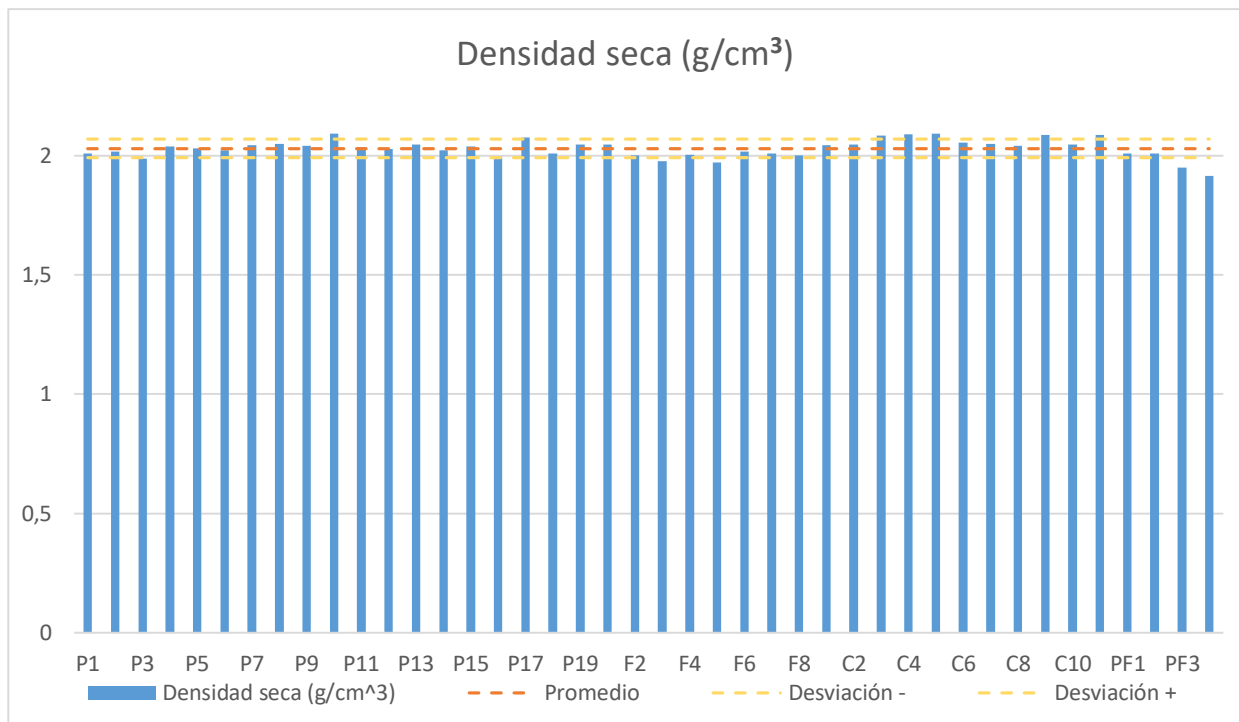


Ilustración 41: Densidad seca de las probetas

El promedio de la densidad seca es de  $2,029453821 \text{ g/cm}^3$  con una desviación típica del  $1,883842 \%$ .

Tras observar las grandes variaciones en la energía de compactación entre los diferentes tipos de probetas cabría esperar una mayor variación de la densidad de las probetas. Sin embargo, la densidad presente muy poca variación entre los diferentes tipos de probetas, lo que podría indicar que pequeños cambios en la densidad implican un gran aumento de la energía de compactación.

La densidad obtenida es un poco menor que la que se calculó en el **apartado 6.1.3** de  $2,126 \text{ g/cm}^3$  y puede deberse a la falta de rigidez de los moldes que ante la presión interna aumentan su volumen interno.

## 6.6 Medida de ultrasonidos de las probetas

Con el objetivo de determinar si se puede establecer una relación entre la velocidad de propagación de ondas de ultrasonidos en el material de las probetas y su resistencia se procedió a la medición de dicha velocidad utilizando el equipo de medición CSI Concrete Tester CCT-4 del que se disponía en el laboratorio. La velocidad de propagación de las ondas de ultrasonido dependerá del módulo de Young (E), del módulo de Poisson ( $\nu$ ) y de la densidad del material ( $\rho$ ).



Ilustración 42: CSI Concrete Tester CCT-4, [1]

Se trata de un ensayo no destructivo en el que se mide el tiempo de propagación en microsegundos ( $\mu\text{s}$ ) de una onda de ultrasonidos desde una sonda emisora a un receptor.

Las mediciones se realizaron de acuerdo a la norma *UNE-EN 12504-4(AENOR 2004)* [12].

Los datos que se muestran a continuación han sido tomados del TFG *Caracterización del comportamiento a compresión simple de probetas de tapia* [1] en el que se recoge en mayor extensión el proceso de medición de la velocidad de ultrasonidos en las probetas.

Se midió la velocidad de propagación en la dirección de compactación de las probetas (DC) y en la dirección transversal a la compactación (DT).

Los datos mostrados en las tablas siguientes son la media de 3 mediciones tomadas en cada dirección.

Tabla 10: Velocidad de propagación de ultrasonidos en probetas prismáticas, [1]

Probetas	DC	DT
P1	1588.00802	1543.984894
P2	1482.32805	1740.143804
P3	1480.72691	1778.722686
P4	1489.76535	1831.111705
P5	1477.19516	1725.179354
P6	891.327295	1835.680792
P7	1623.10273	1795.989681
P8	1524.68644	1765.816158
P9	1572.03033	1785.754407
P10	1690.80092	1990.636499
P11	1636.73576	1867.608542
P12	1579.29449	1847.360272
P13	1564.01849	1876.023774
P14	1577.37637	1904.850238
P15	1576.87713	1854.122041
P16	1617.14224	1894.688476
P17	1666.20658	1813.368462
P18	1546.31094	1768.171185
P19	1675.76374	1793.240786
P20	1522.05974	1760.639295
Promedio	1539.08783	1808.654653
Desviación típica (%)	10.7714199	4.943946538

Tabla 11: Velocidad de propagación de ultrasonidos en probetas cilíndricas, [1]

Probetas	DC	DT
C1	1743.60481	1951.984444
C2	1712.67802	1825.677804
C3	1815.14783	1884.022327
C4	1840.00746	1901.21356
C5	1780.67094	1928.840622
C6	1782.36099	1820.082006
C7	1854.20236	1860.538521
C8	1845.51223	1977.23932
C9	1842.36355	1928.536521
C10	1847.35734	1911.613621
C11	1761.9014	1895.659074
Promedio	1802.34609	1898.673438
Desviación típica (%)	2.70437121	2.589516705



Dicho ensayo de medición de la velocidad de propagación de ondas de ultrasonido no se realizó sobre las probetas destinadas al ensayo de flexión a tres puntos por falta de tiempo en la campaña.

Las probetas ensayadas presentaban un **gradiente en la velocidad de propagación de los ultrasonidos** en la dirección de compactación como se observa en la siguiente ilustración tomada del TFG complementario a este [1]:

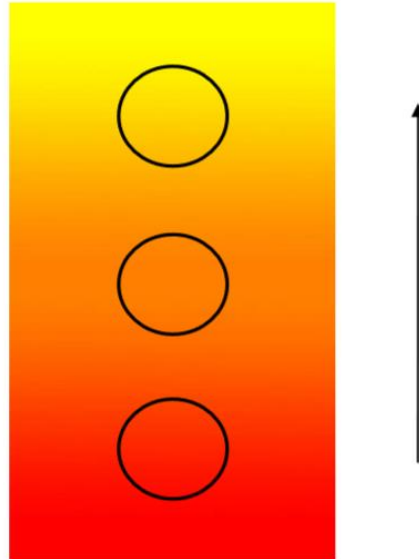


Ilustración 43: Gradiente de velocidades de ultrasonidos, de mayor a menor según flecha, [1]

Este gradiente de la velocidad de propagación está relacionado con un gradiente en la densidad y en el grado de compactación alcanzado durante la fabricación que se discutirá en el **apartado 8: Conclusiones**.

Los círculos marcados son las posiciones aproximadas en las que se realizaron las mediciones.

## 7 ENSAYOS

Los ensayos para la determinación de la resistencia a tracción indirecta ( $f_{ct}$ ), también llamado ensayo brasileño, de las probetas de tapia se han llevado a cabo de forma similar a los ensayos sobre probetas de hormigón endurecida siguiendo la norma *UNE-EN 12390-6: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas* [13].

Por otra parte, para el cálculo de la energía de fractura por unidad de área  $G_f$  se ha seguido la recomendación *RILEM TC 50-FMC Draft Recommendation* [14].

La aplicabilidad de dichas normativas a probetas de tapia se discutirá al final de este capítulo basándose en las similitudes en el comportamiento de probetas de hormigón y de tapia.

### 7.1 Ensayo para la determinación de la resistencia a tracción indirecta, $f_{ct}$

Para la determinación de la resistencia a tracción de las probetas de tapia se se han empleado dos geometrías diferentes, probetas prismáticas y probetas cilíndricas. Asimismo, en las probetas prismáticas se han realizado ensayos con la dirección de tracción perpendicular a la dirección de compactación y haciendo coincidir la dirección de tracción con la dirección de compactación.

Los ensayos brasileños son uno de los métodos disponibles en la actualidad para la determinación de la resistencia a tracción de materiales frágiles. Consisten en someter a una probeta cilíndrica a un estado de compresión en su plano diametral. Debido al estado tensional al que está sometida la probeta cilíndrica la rotura se produce por tracción en el plano diametral en el que se aplica la carga cuando las tensiones que aparecen en dicho plano alcanzan el valor de resistencia a tracción del material. Sin embargo el estado tensional no es uniaxial y aparecen tensiones de compresión perpendiculares a las tensiones de tracción. Como ejemplo se muestra un esquema del estado tensional durante el ensayo brasileño de materiales cerámicos a alta velocidad de deformación tomado de una publicación de la Universidad Politécnica de Madrid [15].

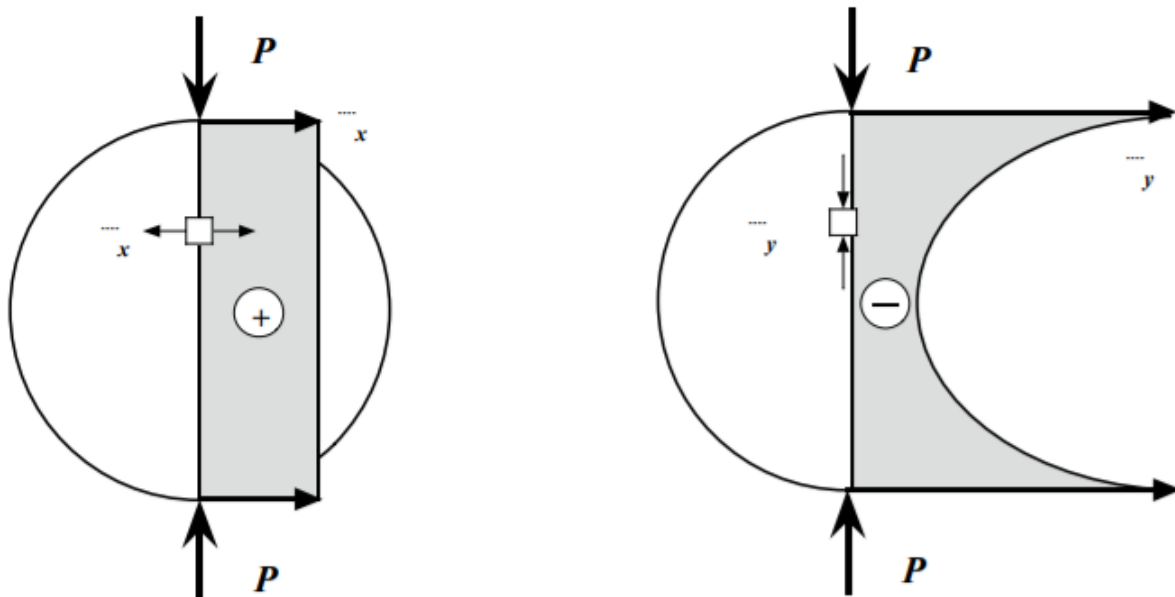


Ilustración 44: Estado tensional durante el ensayo brasileño [15]

La tensión a compresión alcanzada no es uniforme a lo largo del plano de compresión y se estima que es del orden de 3 veces superior al valor máximo de la resistencia a tracción. Para materiales cuya resistencia a compresión es muy superior a su resistencia a tracción, como el hormigón o la tapia, se considera este ensayo una buena medida de la resistencia a tracción del material.

El ensayo brasileño también se lleva a cabo con probetas prismáticas aplicando la carga a lo largo del centro de dos caras opuestas.

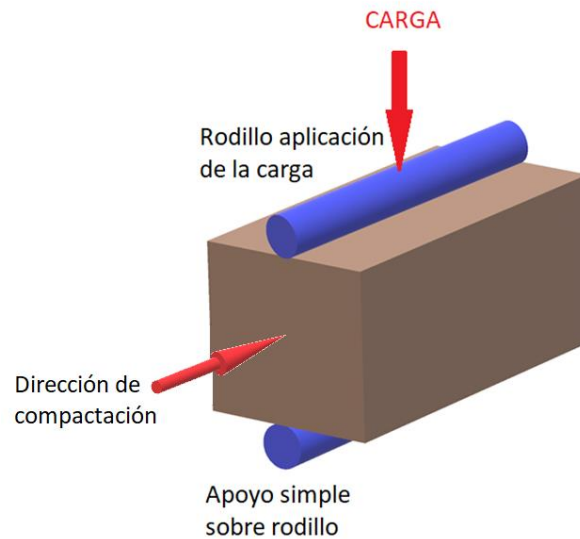


Ilustración 45: Ensayo brasileño. Dirección de tracción perpendicular a la dirección de compactación

En la ilustración anterior se puede observar como el efecto de la compresión de la probeta entre los rodillos genera una tracción indirecta que va en dirección perpendicular a la dirección de compactación y tendería a partir en la probeta en la dirección longitudinal.

Con el objetivo de hayar la resistencia a tracción en la dirección de compresión se realizó otro tipo de ensayo que se muestra a continuación:

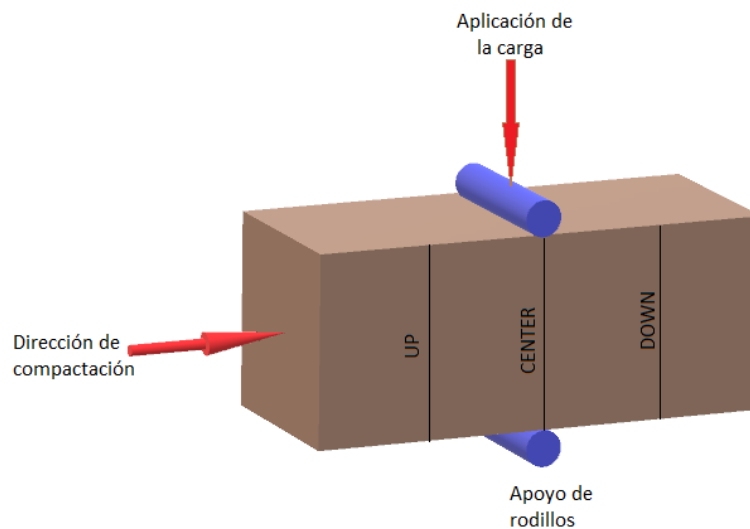


Ilustración 46: Ensayo brasileño. Dirección de tracción en la dirección de la compactación

Se observa como la compresión entre los rodillos genera una tracción que va en la dirección de la compactación. Esta tracción tiende a partir la probeta en su dirección transversal. Cada probeta se ensayó 3 veces en tres posiciones diferentes UP, CENTER y DOWN correspondiendo a su posición en la probeta. UP corresponde a la parte superior de la probeta y DOWN a la parte inferior cercana a la base sobre la que la probeta se apoya.

Con el objetivo de determinar si los trozos restantes de haber partido una probeta en el ensayo brasileño podían ser ensayados de nuevo se varió el orden de ensayo en varias ocasiones. Se ensayaron algunas probetas realizando primero el ensayo brasileño en la parte central (CENTER), y luego en las dos mitades restantes (UP) y (DOWN) a continuación. También se ensayaron probetas en orden UP-CENTER-DOWN y los resultados no se mostraron variables por lo que se determinó que el orden de los ensayos no influía de forma

significativa. La observación de que la zona de fractura de un ensayo previo no influye en ensayos posteriores sobre la misma probeta quedaría por demostrar con una campaña de ensayos más extensa.

Sin embargo teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la modelización numérica realizada por la Universidad Politécnica de Madrid [15] se puede concluir que la zona de influencia del estado tensional generado por el ensayo brasileño es pequeña en comparación con el diámetro de la probeta como se observa en las siguientes imágenes.

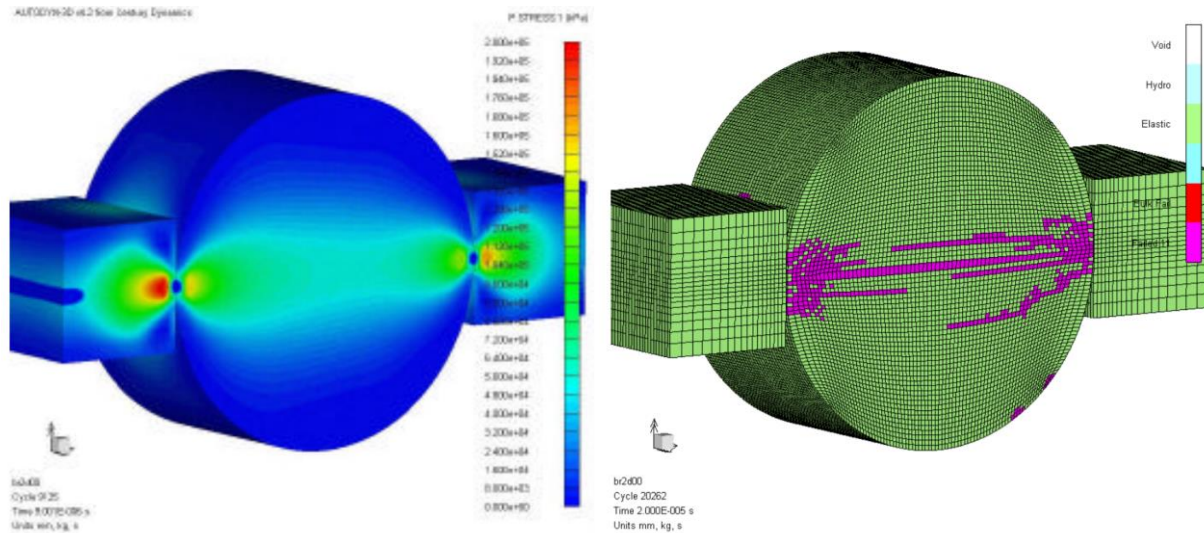


Ilustración 47: Estado tensional, *Modelización numérica de la fractura en ensayos brasileños de materiales cerámicos a alta velocidad de deformación* [15]

Ilustración 48: Estado de la fisuración, *Modelización numérica de la fractura en ensayos brasileños de materiales cerámicos a alta velocidad de deformación* [15]

En el caso de que el comportamiento de la tapia y los materiales cerámicos modelizados en dicho estudio se asemejen se podría concluir que el ensayo previo de una probeta no influye en ensayos posteriores realizados a una distancia suficientemente alejada de la zona de fractura.

### 7.1.1 Realización de los ensayos

Los ensayos se realizaron de acuerdo a la norma *UNE-EN 12390-6* [13] con un procedimiento similar al empleado en el ensayo de probetas de hormigón.

Para ello se empleó la máquina universal de ensayo disponible en el laboratorio y utillaje con superficie cilíndrica para los apoyos.



Ilustración 49: Ensayo brasileño, tracción en la dirección de compactación

### 7.1.2 Relación, Fuerza aplicada vs Tensión de tracción

Según la norma *UNE-EN 12390-6* [13] la resistencia a tracción indirecta es:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}$$

Donde

$f_{ct}$  <sup>def</sup> Resistencia a tracción indirecta, en megapascales (MPa)

$F$  <sup>def</sup> Carga máxima, en newtons (N)

$L$  <sup>def</sup> Longitud de la línea de contacto de la probeta, en milímetros (mm)

$d$  <sup>def</sup> Dimensión de la sección transversal, en milímetros (mm)

### 7.1.3 Resultados del ensayo

La tabla a continuación recopila las variables utilizadas para el cálculo de la resistencia a tracción indirecta en la dirección perpendicular a la compactación:

Tabla 12: Cálculo  $f_{ct}$  en la dirección perpendicular a la compactación

Probeta	F (N)	L (mm)	d (mm)	$f_{ct}$ (MPa)
P2	2948	203	103,09	0,08968
P3	3418	202	104,38	0,103201
P4	2834	202	102,54	0,087103
P7	3069	202	103,14	0,093777
P9	3633	202	103,38	0,110754
P14	2199	201	103	0,06762
P16	2394	201	103,79	0,073055
P20	3136	201	102,66	0,096752
C1	1788	114	102,7	0,097224
C2	1592	114	102,03	0,087135
C6	1907	113	102,3	0,105021
C7	1872	113	102,44	0,102953
C8	1820	113	102,63	0,099908

Los valores obtenidos para las probetas prismáticas se representan en la figura siguiente:

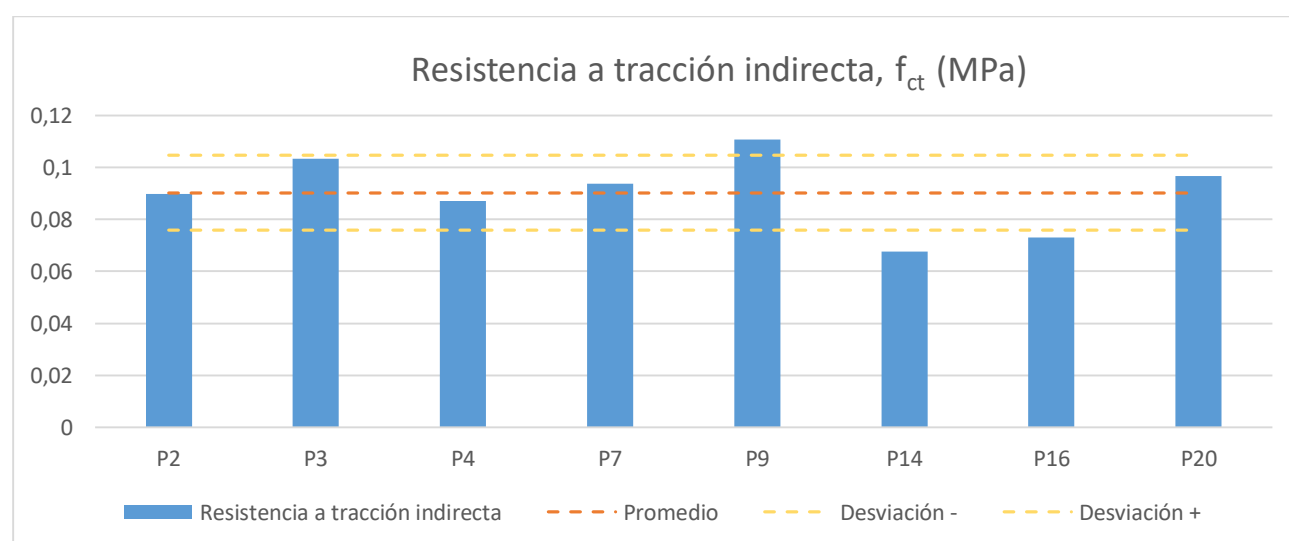


Ilustración 50: Resistencia a tracción en la dirección perpendicular a la compactación, probetas prismáticas. El promedio de la resistencia  $f_{ct}$  es de 0,090242747 MPa con una desviación típica del 16,0081814 %.

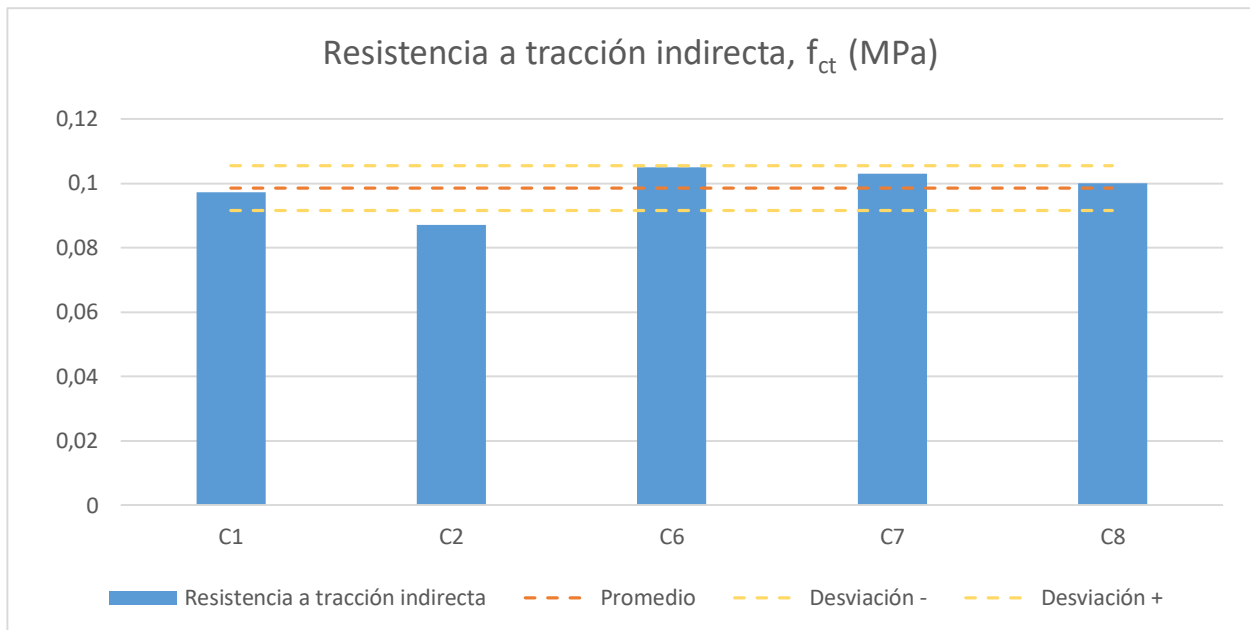


Ilustración 51: Resistencia a tracción en la dirección perpendicular a la compactación, probetas cilíndricas

El promedio de la resistencia  $f_{ct}$  es de 0,098447969 MPa con una desviación típica del 7,0944159 %.

La tabla siguiente recoge los valores empleados en el cálculo de la resistencia a tracción indirecta en la dirección de compactación:

Tabla 13: Cálculo  $f_{ct}$  en la dirección de la compactación

Probeta	F (N)	L (mm)	d (mm)	$f_{ct}$ (MPa)
P1 up	1251	103,19	101	0,07641497
P1 center	1180	103,19	101	0,072078069
P1 down	722	103,19	101	0,044102005
P6 up	1047	103,44	101	0,063799448
P6 center	862	103,44	101	0,052526384
P6 down	613	103,44	101	0,037353449
P13 up	1045	103,42	100,3	0,064134387
P13 center	1094	103,42	100,3	0,067141645
P13 down	945	103,42	100,3	0,057997125
P18 up	1239	103,22	101,72	0,075124436
P18 center	970	103,22	101,72	0,058814126
P18 down	774	103,22	101,72	0,046930035

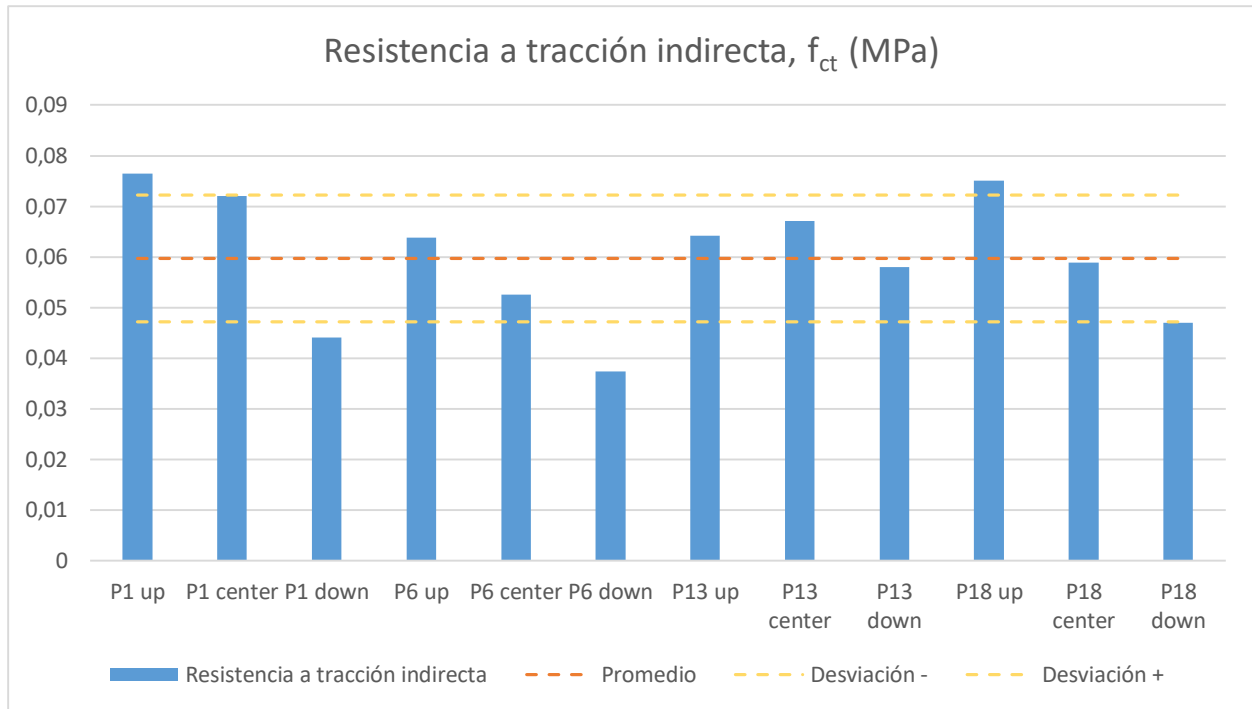


Ilustración 52: Resistencia a tracción en la dirección de la compactación, probetas prismáticas

El promedio de la resistencia  $f_{ct}$  es de 0,05970134 MPa con una desviación típica del 20,9649476 %.

Observando los valores de resistencia obtenidos en las diferentes partes de las probetas ensayadas se puede concluir que la resistencia es mayor en la parte superior de la probeta y se va reduciendo al acercarse a la parte inferior.

Esta presencia de un **gradiente de resistencia** se valora que puede ser causada por un **gradiente en la densidad** de las probetas originado durante el proceso de fabricación. Este fenómeno se estudiará con mayor detenimiento en el **apartado 8: Conclusiones** y tiene relación con el **gradiente de velocidad de propagación de ultrasonidos** mencionado en el **apartado 6.6**.

## 7.2 Ensayo para la determinación de la energía de fractura por unidad de área, $G_f$

El ensayo de flexión a tres puntos es uno de los métodos disponibles en la actualidad para la determinación de la energía de fractura por unidad de área para materiales frágiles. Debido a la escasez de normativa referente a los ensayos con probetas de tapia se ha seguido la recomendación *RILEM TC 50-FMC Draft Recommendation* [14] para el ensayo de probetas de hormigón.

En ensayo consiste en someter a una probeta esbelta a un estado de flexión a tres puntos, dos apoyos inferiores y un rodillo central sobre el que se aplica la carga. Dicha probeta cuenta con una entalla en la parte inferior cuyo objetivo es actuar como concentrador de tensiones y se el punto de inicio de la fractura. El objetivo del ensayo es medir la fuerza aplicada y el desplazamiento o flecha de la parte central de la probeta para calcular posteriormente la energía absorbida por unidad de área destinada al crecimiento de la fractura hasta la ruptura completa de la probeta.



A continuación se muestra un esquema del montaje del ensayo.

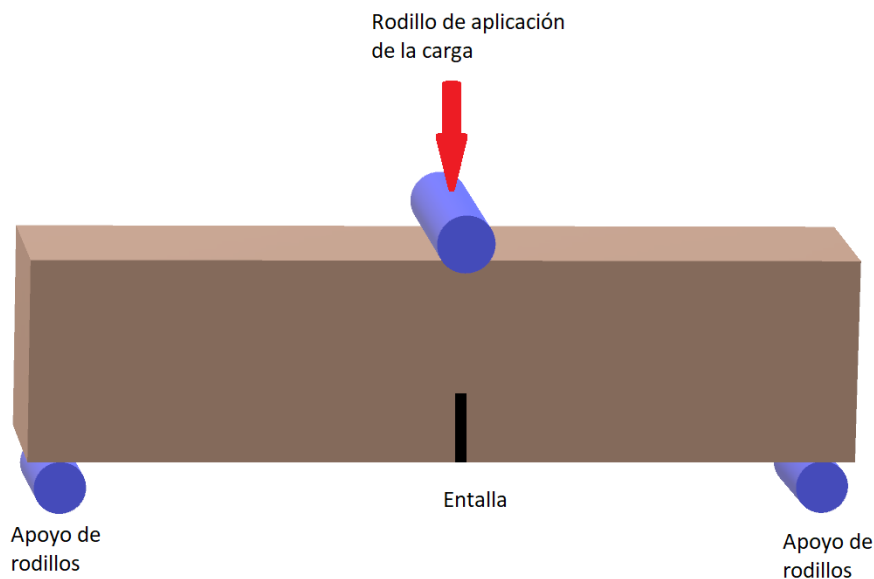


Ilustración 53: Enyaso de flexión a tres puntos

### 7.2.1 Realización de los ensayos

Para la realización de los ensayos se siguió la recomendación *RILEM TC 50-FMC Draft Recommendation* [14] con las medidas estándar utilizadas para las probetas de hormigón de 100x100x450 mm debido a que se disponía en el laboratorio del utillaje necesario procedente de ensayos previos con probetas de este material.

La entalla o hendidura necesaria en las probetas se realizó con una sierra radial de con un disco con partículas incrustadas de polvo de diamante y la profundidad elegida fue de 20mm. Tras el corte de la entalla el acabado superficial del fondo de la grieta se observó regular, sin embargo sí se observó un leve desprendimiento de partículas a lo largo de las paredes de la hendidura. La entalla final constaba de un ancho de unos 5 mm y una profundidad media ligeramente superior a los 20 mm.

Para la medición de la flecha en la parte central de las probetas se fijó una placa metálica con adhesivo compuesto sobre la que se midieron los desplazamientos utilizando un transductor LVDT (Linear Variable Differential Transformer).

Además se fijaron dos placas a ambos lados de la hendidura para fijar un sensor CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) y así medir el desplazamiento de la apertura de la boca de la grieta.

El resto del utillaje necesario para recrear las condiciones de contorno del ensayo se encontraba en el laboratorio y

El ensayo se llevó a cabo en la máquina universal de ensayos, se disponía del utillaje necesario debido a ensayos previos con probetas de hormigón, se utilizaron rodillos para los apoyos.



### 7.2.2 Relación, Fuerza aplicada vs Energía de fractura por unidad de área

La recomendación *RILEM TC 50-FMC Draft Recommendation* [14] recoge la geometría y dimensiones deseadas para el ensayo de flexión a tres puntos como se observa en las imágenes siguientes.

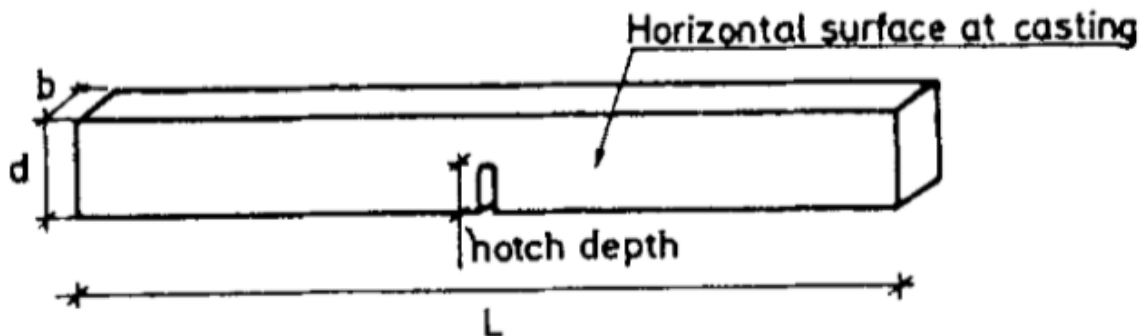


Ilustración 54: Geometría de probetas para el ensayo de flexión a tres puntos, [14]

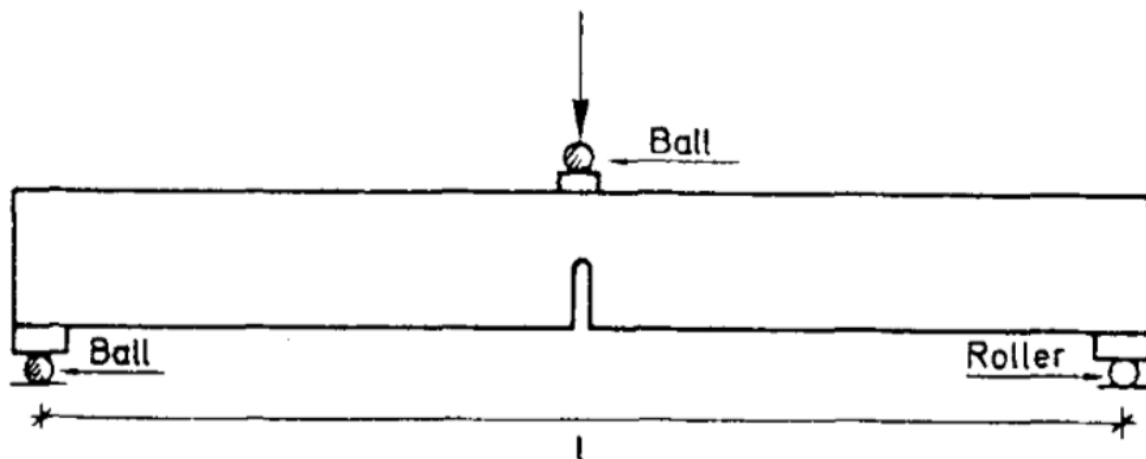


Ilustración 55: Condiciones de contorno para el ensayo de flexión a tres puntos, [14]

En la siguiente tabla se observa una recomendación de las dimensiones propuestas para el ensayo:

TABLE I  
SIZES OF SPECIMENS.

$D_{max}$ (mm)	Depth $d$ (mm)	Width $b$ (mm)	Length $L$ (mm)	Span $l$ (mm)
1-16 . . . . .	$100 \pm 5$	$100 \pm 5$	$840 \pm 10$	$800 \pm 5$
16.1-32 . . . . .	$200 \pm 5$	$100 \pm 5$	$1,190 \pm 10$	$1,130 \pm 5$
32.1-48 . . . . .	$300 \pm 5$	$150 \pm 5$	$1,450 \pm 10$	$1,385 \pm 5$
48.1-64 . . . . .	$400 \pm 5$	$200 \pm 5$	$1,640 \pm 10$	$1,600 \pm 5$

Ilustración 56: Dimensiones de referencia RILEM 50-FMC Draft Recommendation, [14]

En el caso de las probetas utilizadas, de dimensiones 100x100x450 mm, se recomienda una longitud  $L=840$  mm y una separación entre apoyos  $l=800$  mm. Estas son unas longitudes aceptables para probetas de hormigón, sin embargo, las probetas de tapia no permiten una construcción tan esbelta que soporte flexión. Por los que se tomó una longitud  $L=450$  mm y una separación  $l=400$  mm.

Según la recomendación *RILEM TC 50-FMC Draft Recommendation* [14], la energía de fractura  $G_f$  se calcula:

$$G_f = \frac{(W_0 + mg\delta_0)}{A_{lig}} \quad [N/m \text{ o } J/m^2]$$

Donde

$G_f \stackrel{\text{def}}{=} \text{Energía de fractura por unidad de área (N/m ó J/m}^2\text{)}$

$W_0 \stackrel{\text{def}}{=} \text{Área debajo de la curva fuerza vs. desplazamiento (J), ver figura Cálculo de } W_0$

$\delta_0 \stackrel{\text{def}}{=} \text{Desplazamiento vertical en el punto de ruptura completa(m), ver figura Cálculo de } W_0$

$A_{lig} \stackrel{\text{def}}{=} \text{Proyección del área de fractura sobre el eje longitudinal de la probeta (m}^2\text{)}$

$m \stackrel{\text{def}}{=} m_1 + 2m_2 \text{ (kg)}$

$m_1 \stackrel{\text{def}}{=} \text{Masa de la probeta entre los soportes, calculada como la masa de la}$

*probeta multiplicada por*  $\frac{l}{L}$  (m)

$m_2 \stackrel{\text{def}}{=} \text{Masa del rodillo de aplicación de la carga (kg)}$

$\delta_0 \stackrel{\text{def}}{=} \text{Desplazamiento vertical en el punto de ruptura completa (m), ver figura Cálculo de } W_0$

El sentido físico de las variables  $W_0$  y  $\delta_0$  se representa a continuación:

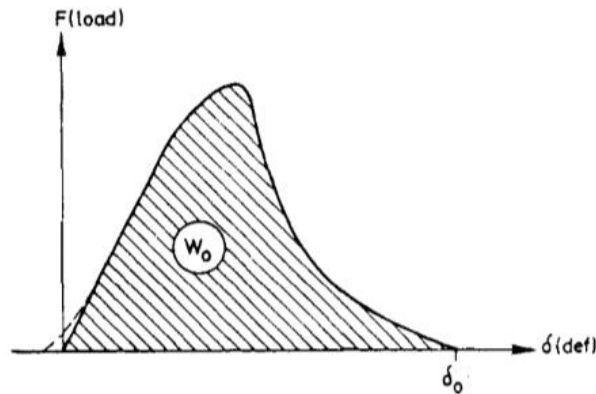


Ilustración 57: Cálculo de  $W_0$

### 7.2.3 Resultados de los ensayos

Tras la realización de los ensayos las variables obtenidas fueron los datos almacenados del transductor de desplazamientos LVDT, del sensor CMOD y la fuerza aplicada a través de la célula de carga. Dichos datos se representan a continuación:

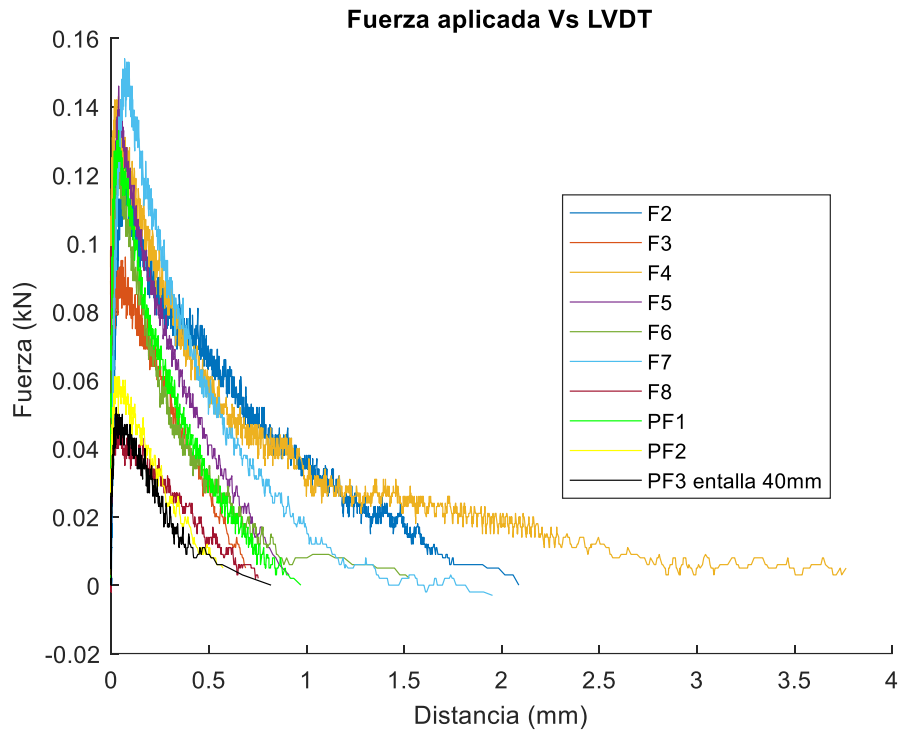


Ilustración 58: Fuerza Vs medición del sensor LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

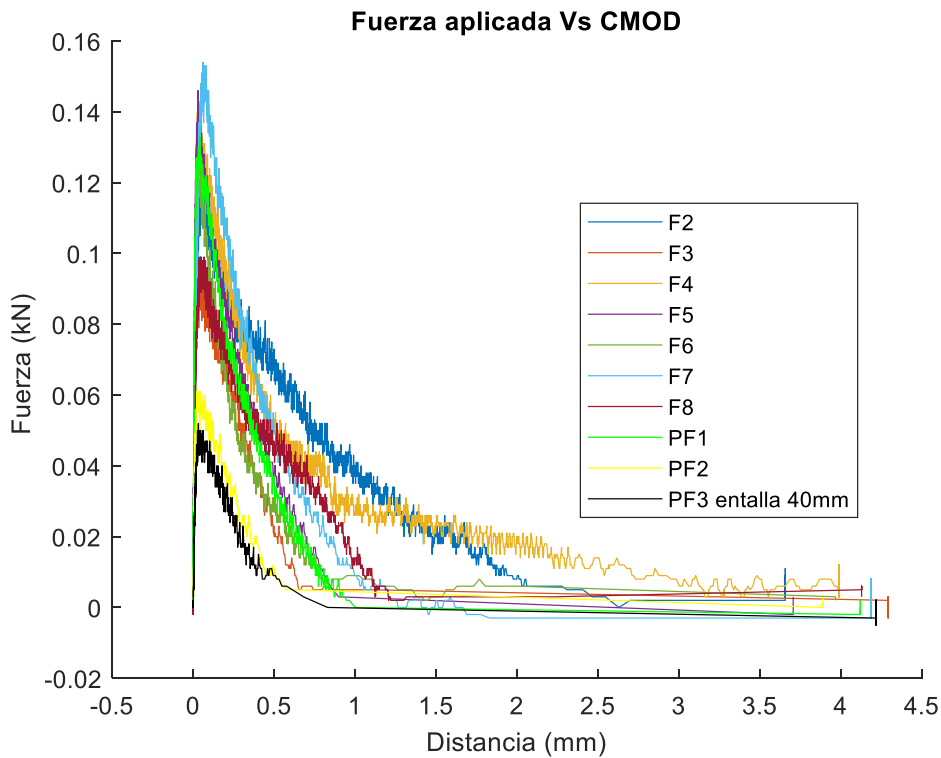


Ilustración 59: Fuerza Vs medición del sensor CMOD (Crack Mouth Opening Displacement)

El área bajo la curva Fuerza Vs desplazamiento del transductor LVDT,  $W_0$ , se calculó mediante la función *trapz* incluida en el software de cálculo matricial MatLab de forma análoga al apartado 6.3.5.

Las siguientes tablas recogen los datos referentes al ensayo de flexión a tres puntos:

Tabla 14: Datos geométricos, ensayo de flexión a tres puntos

Probeta	l	L	d	b	Profundidad entalla (m)	Área de fractura (m <sup>2</sup> )
F2	0,4	0,45	0,10474	0,105	0,02252	0,0086331
F3	0,4	0,45	0,106	0,105	0,023	0,008715
F4	0,4	0,45	0,1056	0,104	0,0256	0,00832
F5	0,4	0,45	0,1055	0,1065	0,0232	0,00876495
F6	0,4	0,45	0,1037	0,105	0,0237	0,0084
F7	0,4	0,45	0,10314	0,10746	0,0207	0,008859002
F8	0,4	0,45	0,1033	0,1076	0,0205	0,00890928
PF1	0,4	0,45	0,102	0,104	0,022	0,00832
PF2	0,4	0,45	0,102	0,104	0,025	0,008008
PF3 40mm	0,4	0,45	0,103	0,105	0,043	0,0063

La profundidad de la entalla se midió con la ayuda de un pie de rey antes de la realización de los ensayos y el valor que aparece en la tabla es la media de tres mediciones.

Tabla 15: Energía de fractura, ensayo de flexión a tres puntos

Probeta	$m_0$ (kg)	$m_1$ (kg)	$m_2$ (kg)	$m$ (kg)	$\delta$ (m)	$W_0$ (J)	$G_f$ (N/m) ó (J/ m <sup>2</sup> )
F2	10,06553765	8,947144582	0	8,947145	0,002087	0,084258	30,98214
F3	10,07826433	8,958457185	0	8,958457	0,000688	0,033184	10,7445
F4	10,04539542	8,929240376	0	8,92924	0,003764	0,109055	52,73629
F5	10,08181554	8,961613814	0	8,961614	0,00091	0,049384	14,76567
F6	10,04818803	8,93172269	0	8,931723	0,001527	0,044352	21,20815
F7	10,08573512	8,965097888	0	8,965098	0,001952	0,06878	27,1423
F8	10,09241822	8,971038415	0	8,971038	0,000752	0,017237	9,362959
PF1	9,652644311	8,580128277	0	8,580128	0,000971	0,042446	14,92502
PF2	9,647197221	8,575286418	0	8,575286	0,000572	0,016791	8,105554
PF3 40mm	9,636623775	8,5658878	0	8,565888	0,000818	0,014006	13,13391

En la tabla se han recogido los valores de los ensayos para algunas probetas de prueba (PF) sin embargo no se tendrán en cuenta para el cálculo del promedio ni para su representación al haberse realizado un seguimiento menos exhaustivo para estas probetas de prueba.

Los resultados de los ensayos de flexión a tres puntos se representan a continuación.

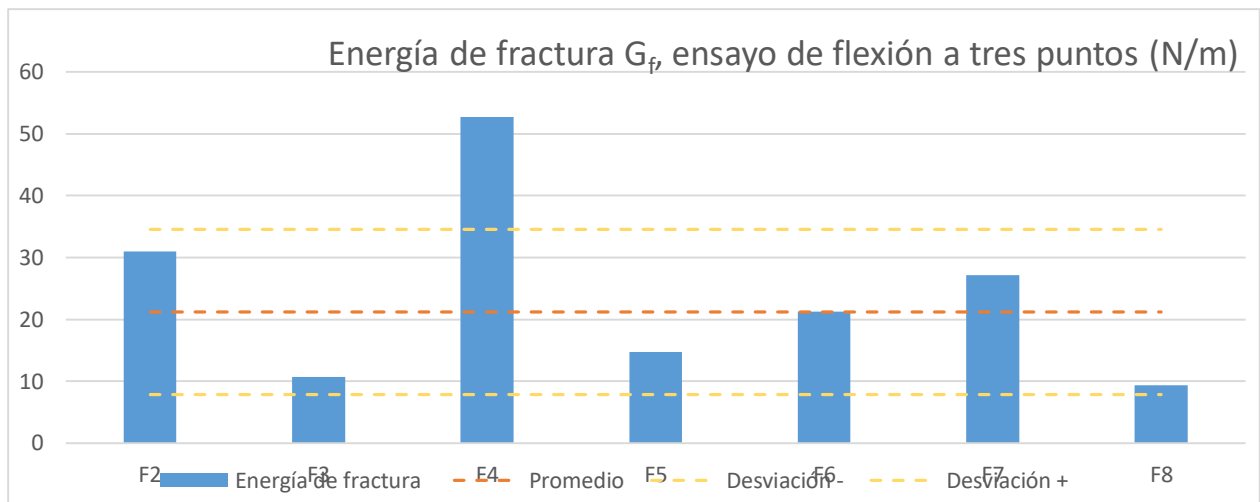


Ilustración 60: Energía de fractura por unidad de área  $G_f$

El promedio de la energía de fractura  $G_f$  es de 23,84886111 N/m con una desviación típica del 63,2968113%. El hecho de que la energía de fractura de la probeta F4 sea muy superior al resto se puede explicar observando la gráfica de Fuerza Vs desplazamiento del transductor LVDT, donde la curva correspondiente a dicha probeta encierra más área que el resto.

### 7.3 Ensayos para la determinación de la resistencia a compresión simple, $f_{ck}$

Con el objetivo de realizar una comparativa posterior, se recojen en este apartado los resultados de los ensayos a compresión simple realizados por Isabel Rodríguez Jiménez en su TFG [1].

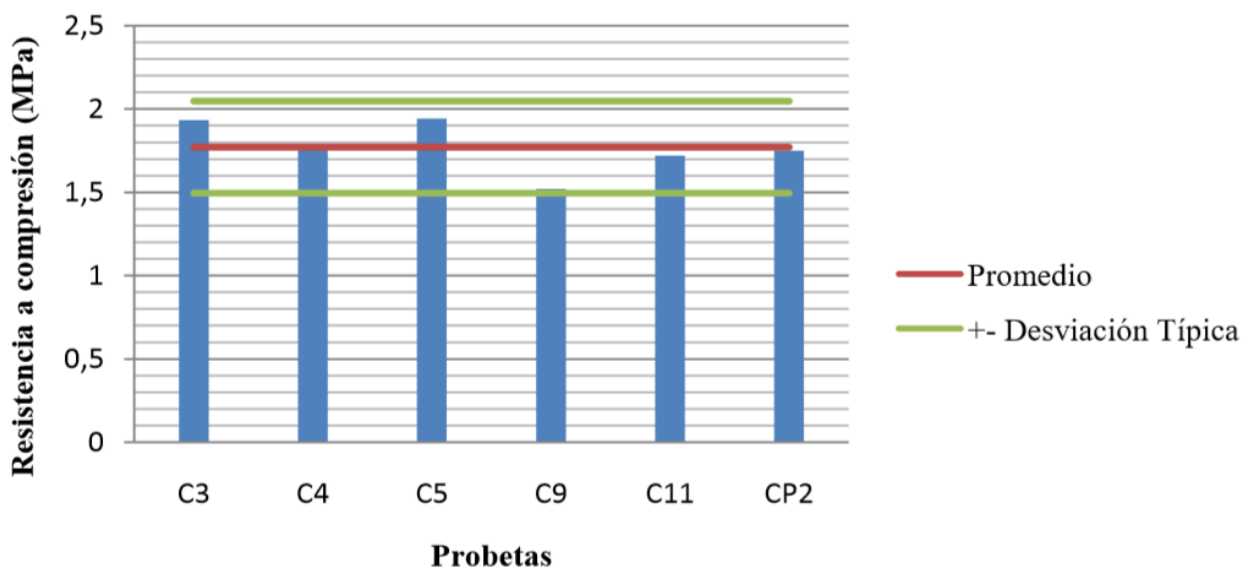
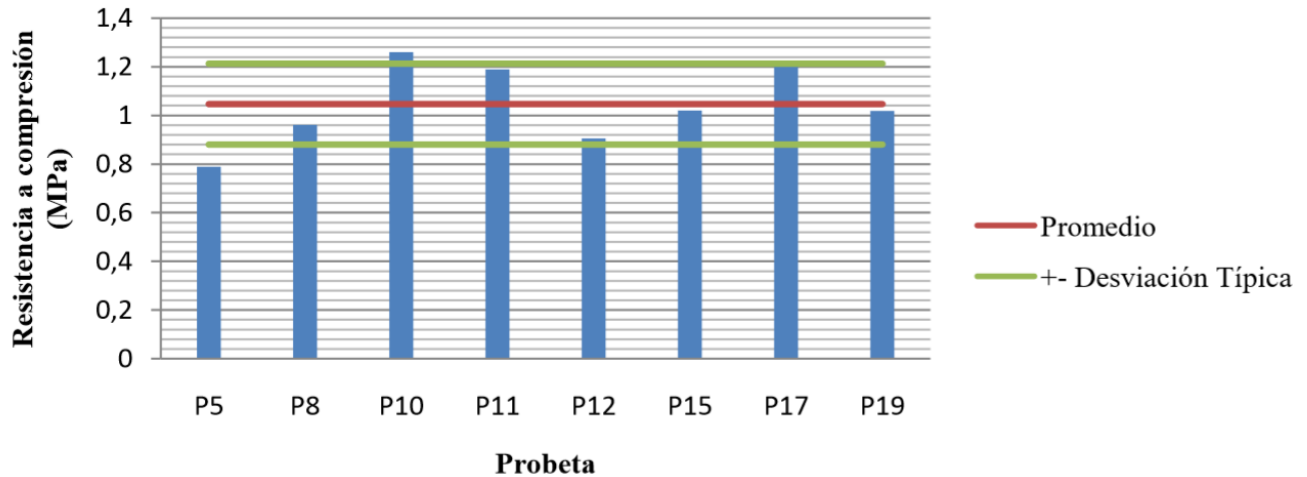


Ilustración 61: Resistencia a compresión  $f_{ck}$ , probetas cilíndricas

Tabla 16: Resistencia a compresión  $f_{ck}$ , probetas cilíndricas

Probeta	$f_{ck}$
C3	1,93433014
C4	1,75426541
C5	1,94371156
C9	1,52059935
C11	1,71961555
CP2	1,75007734

Ilustración 62: Resistencia a compresión  $f_{ck}$ , probetas prismáticasTabla 17: Resistencia a compresión  $f_{ck}$ , probetas prismáticas

Probeta	$f_{ck}$
P5	0,78856365
P8	0,96080585
P10	1,2605538
P11	1,1900052
P12	0,90594007
P15	1,02081234
P17	1,2260848
P19	1,01886393

## 7.4 Validez de la normativa

La aplicación de la normativa para la realización de los ensayos parte de la hipótesis de que la tapia y el hormigón, material para el cual están diseñados los ensayos, se comportan de forma similar y por tanto se pueden extraer conclusiones válidas de los valores obtenidos.

Ambos materiales funcionan bien a compresión y presentan una baja resistencia a tracción.

En cuanto a los ensayos de flexión a tres puntos, se realiza la hipótesis de que la expresión empleada para el cálculo de la energía de fractura  $G_f$  es válida para valores de la longitud de las probetas menores a los valores recomendados por *RILEM TC FMC-50*. Para la sección de las probetas utilizadas se recomienda una longitud de 800 mm y sin embargo las probetas ensayadas tenían una longitud de 450 mm.

## 7.5 Correlación de Resistencia a tracción y energía de fractura con otros parámetros

Dado que durante la fabricación y ensayo de las probetas se han controlado numerosos parámetros, en este apartado se dispone a representar la resistencia a tracción y la energía de fractura en función de dichos parámetros con el objetivo de determinar si existe alguna dependencia entre variables.

### 7.5.1 Resistencia Vs energía de compactación por unidad de volumen

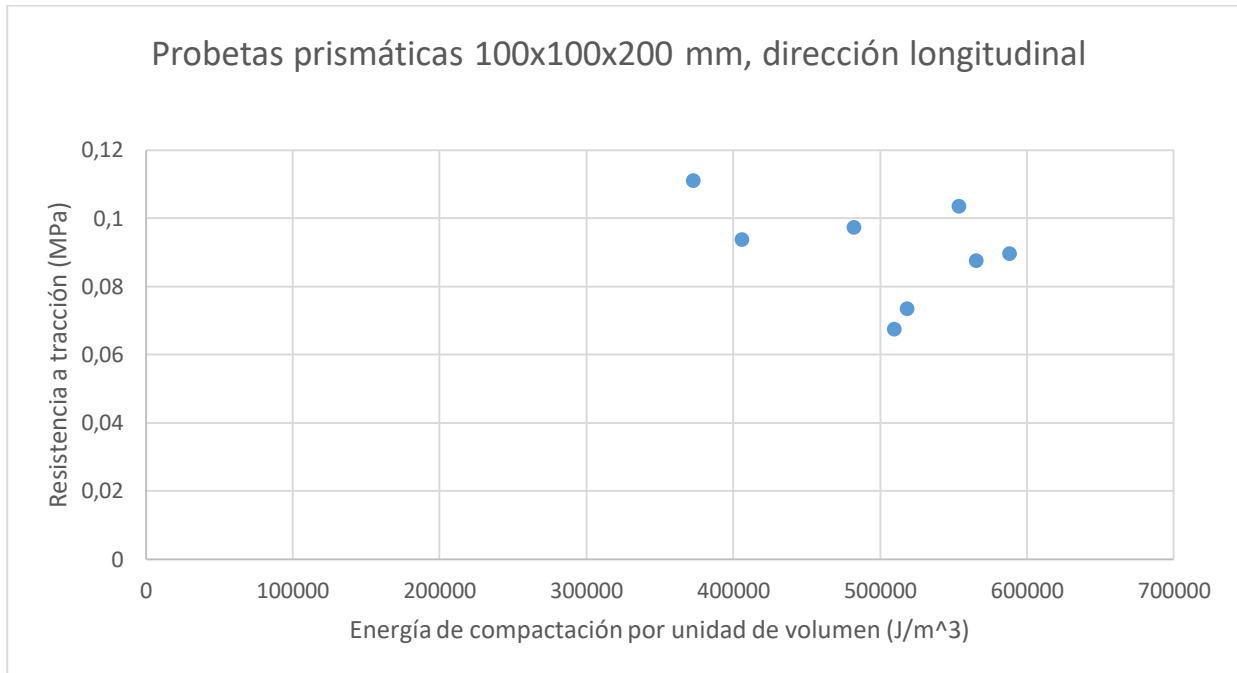


Ilustración 63: Resistencia a tracción Vs Energía de compactación (1)

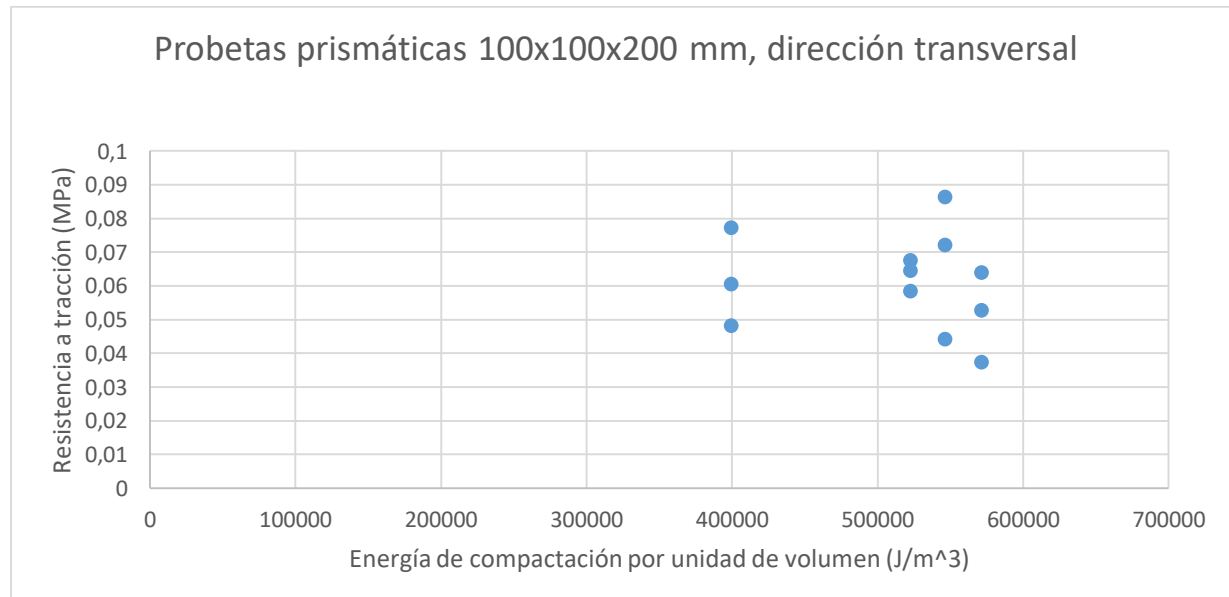


Ilustración 64: Resistencia a tracción Vs Energía de compactación (2)

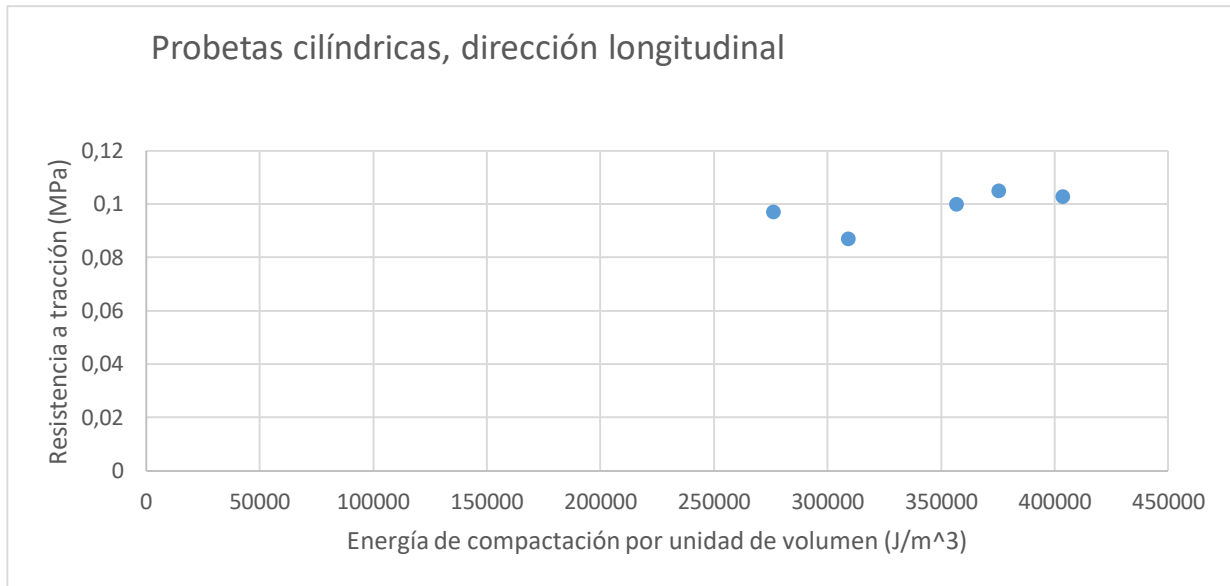


Ilustración 65: Resistencia a tracción Vs Energía de compactación (3)

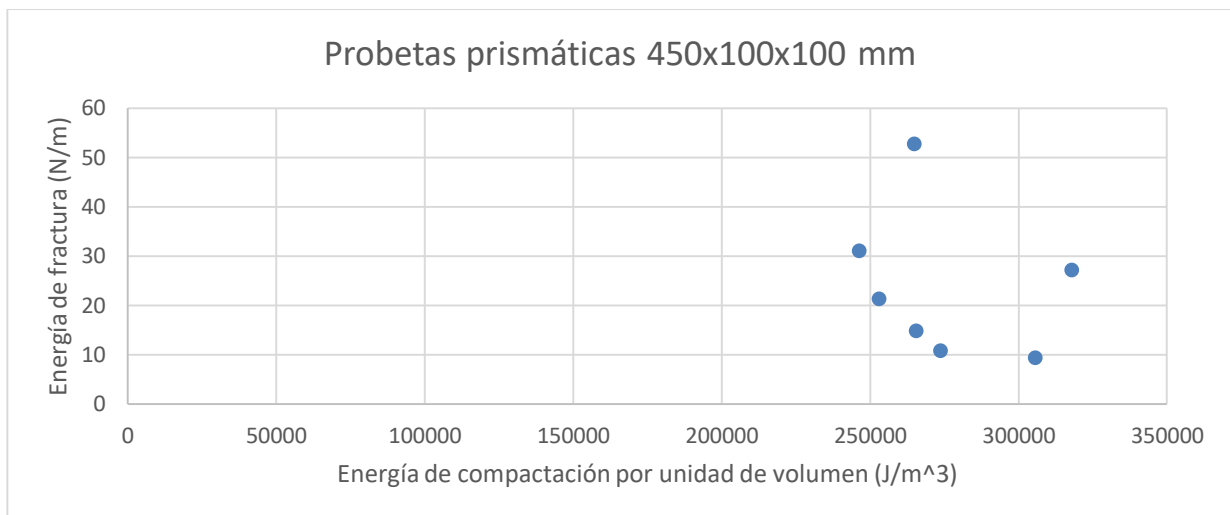


Ilustración 66: Energía de fractura por unidad de área Vs Energía de compactación por unidad de volumen



### 7.5.2 Resistencia Vs humedad inicial

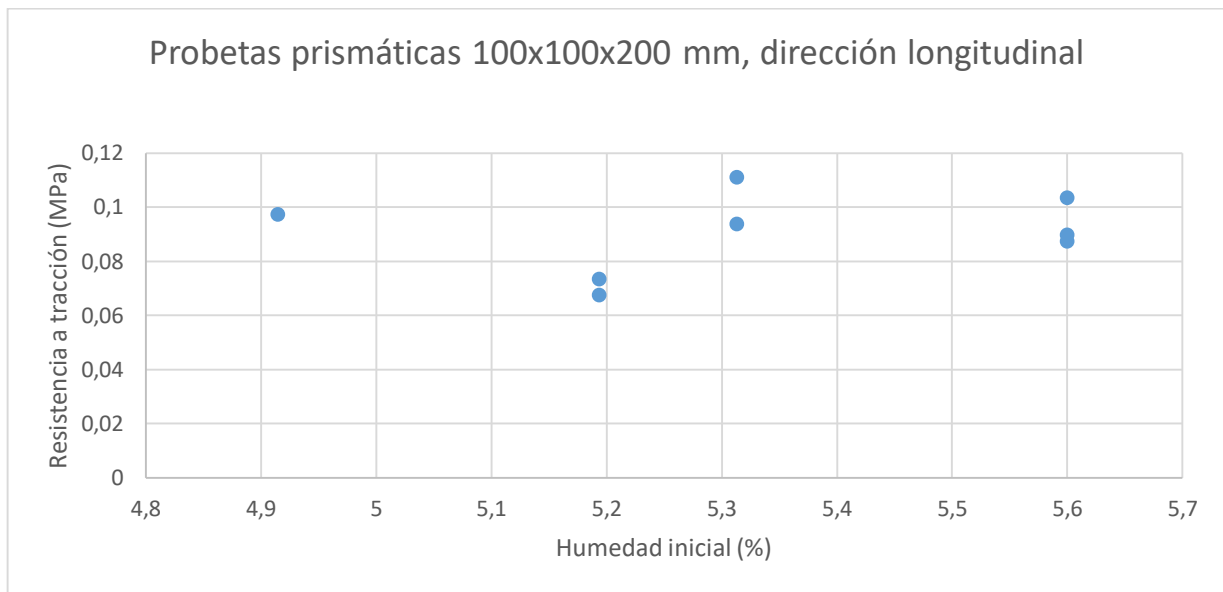


Ilustración 67: Resistencia a tracción Vs humedad inicial (1)

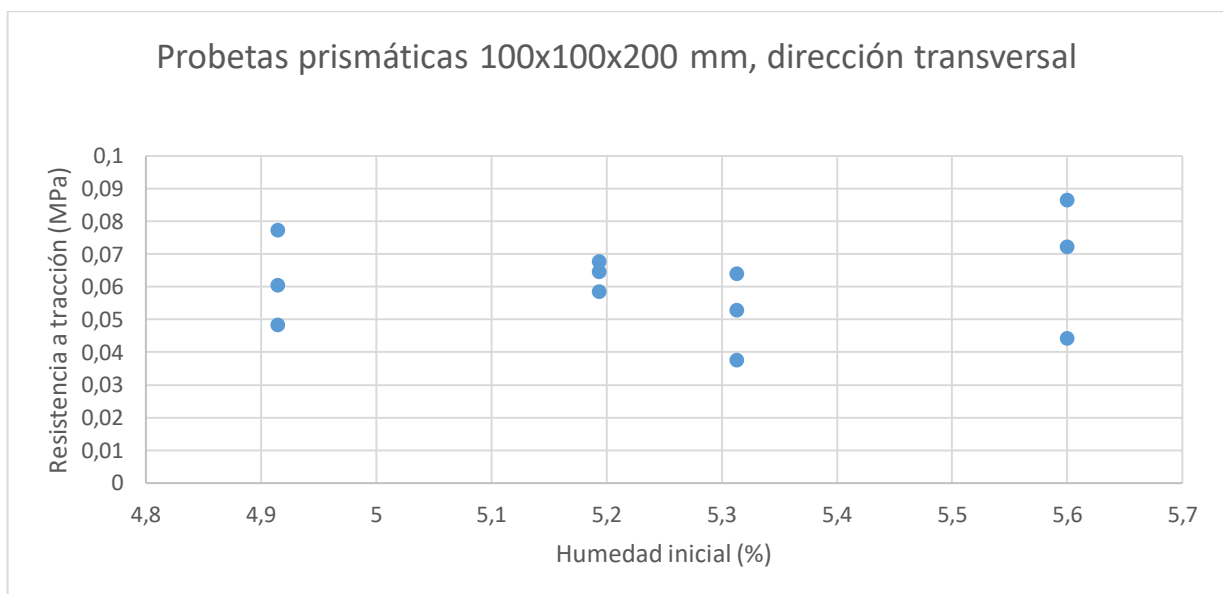


Ilustración 68: Resistencia a tracción Vs humedad inicial (2)

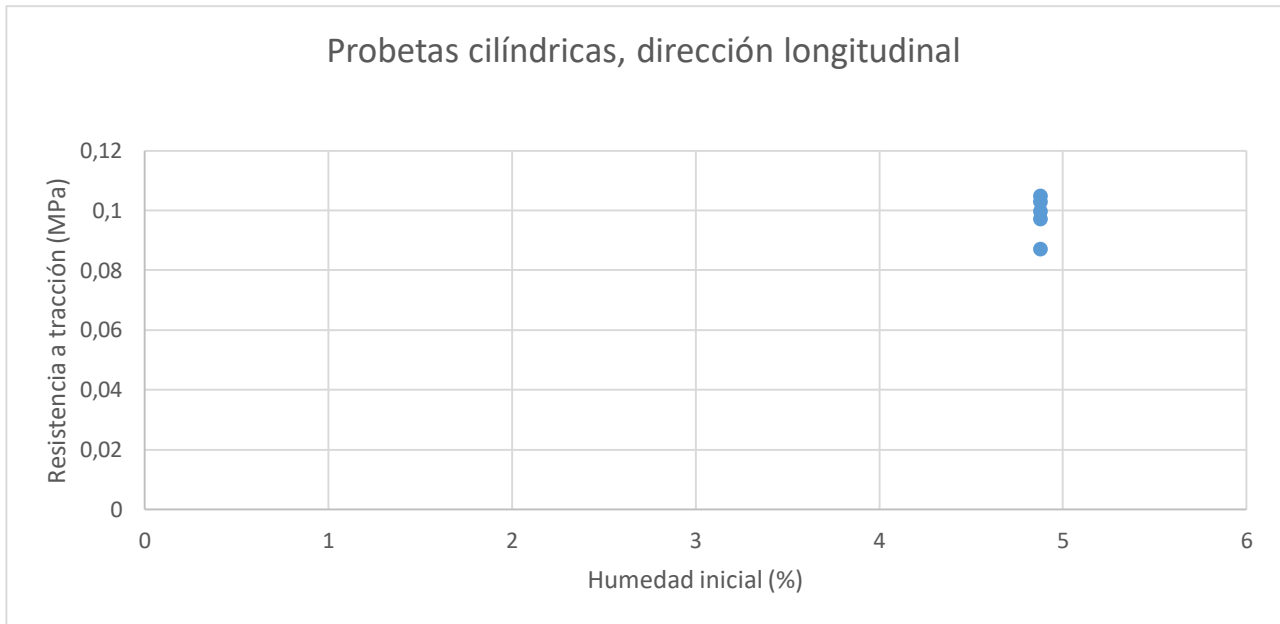


Ilustración 69: Resistencia a tracción Vs humedad inicial (3)

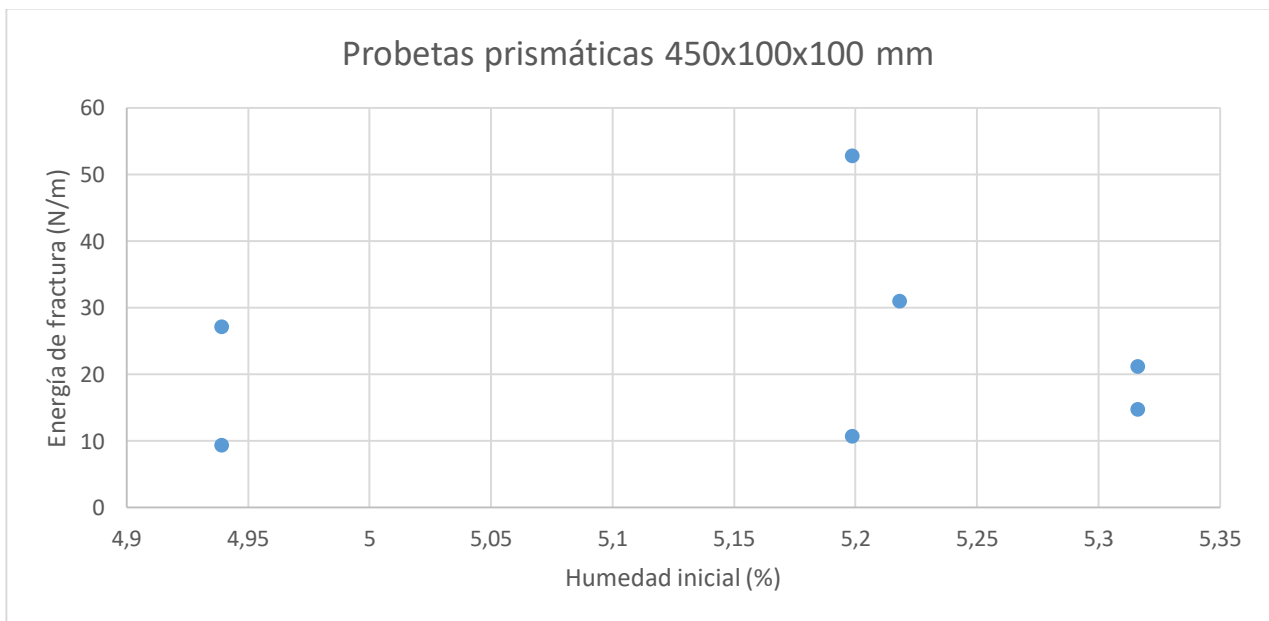


Ilustración 70: Energía de fractura por unidad de área Vs humedad inicial

### 7.5.3 Resistencia Vs humedad final

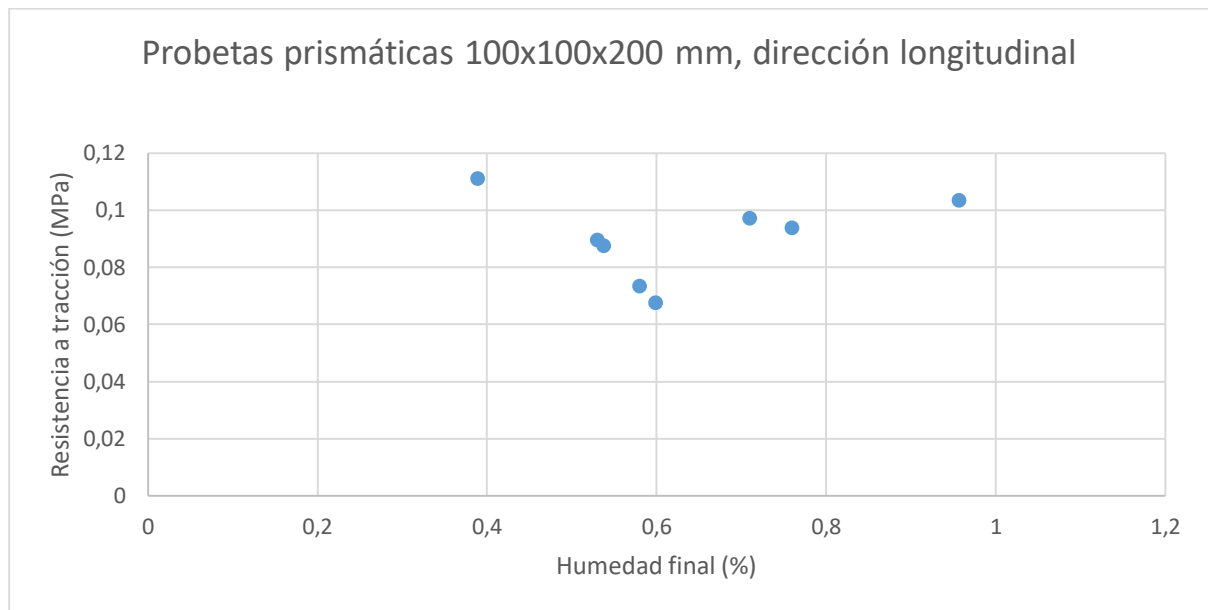


Ilustración 71: Resistencia a tracción Vs humedad final (1)

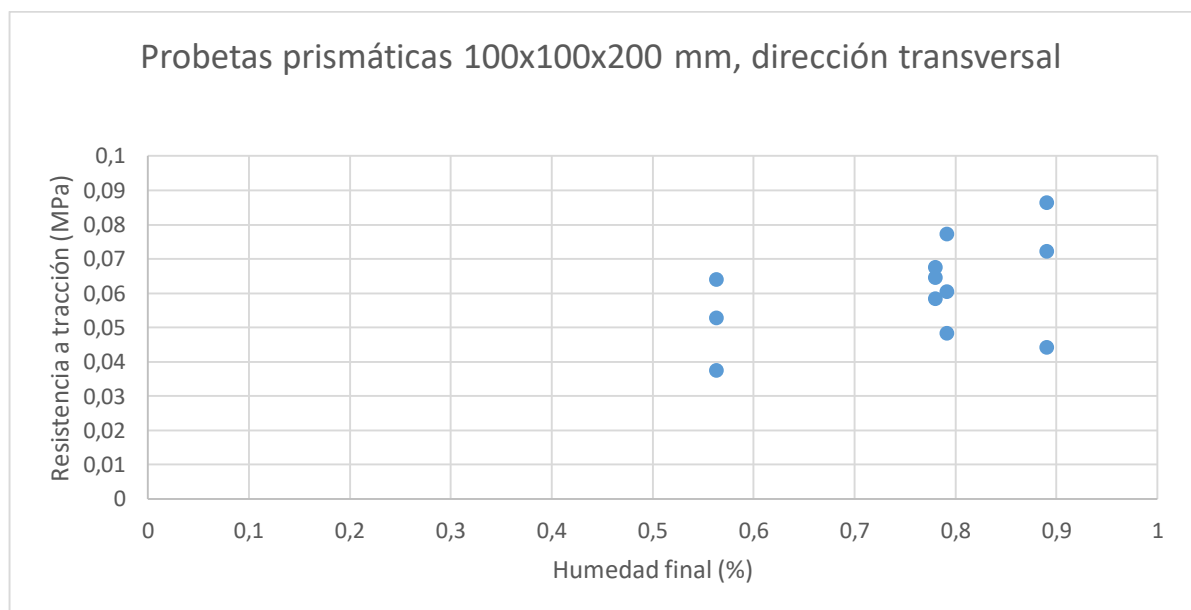


Ilustración 72: Resistencia a tracción Vs humedad final (2)

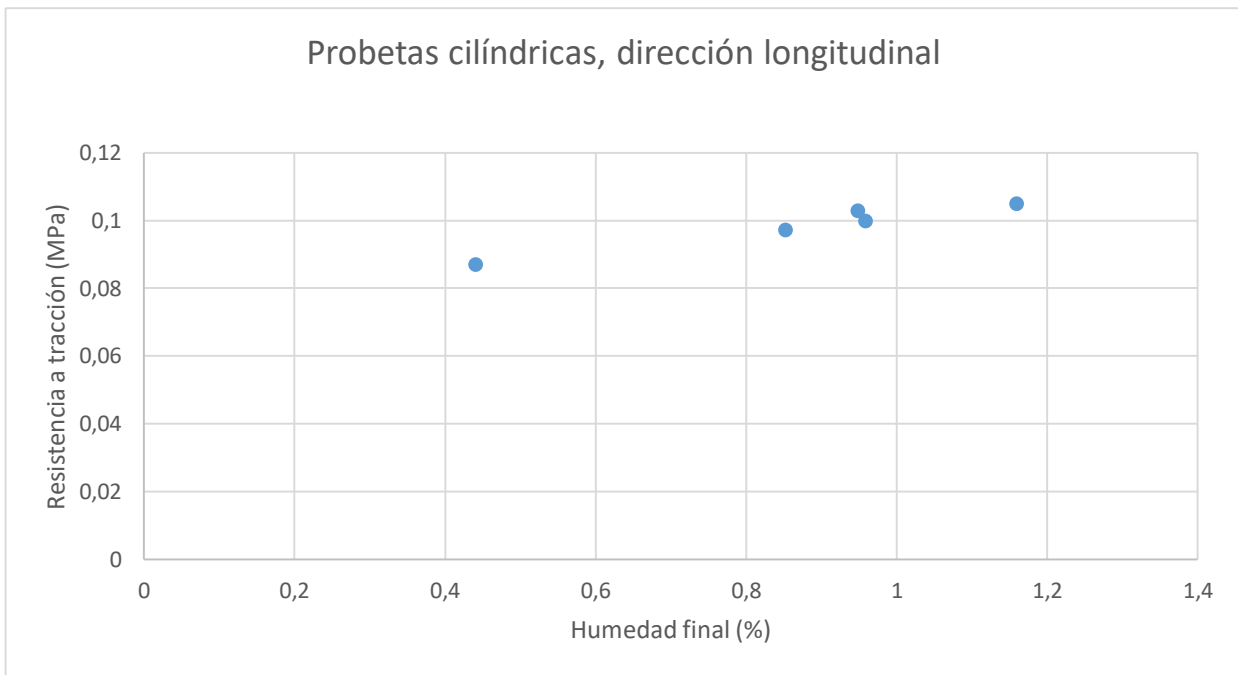


Ilustración 73: Resistencia a tracción Vs humedad final (3)

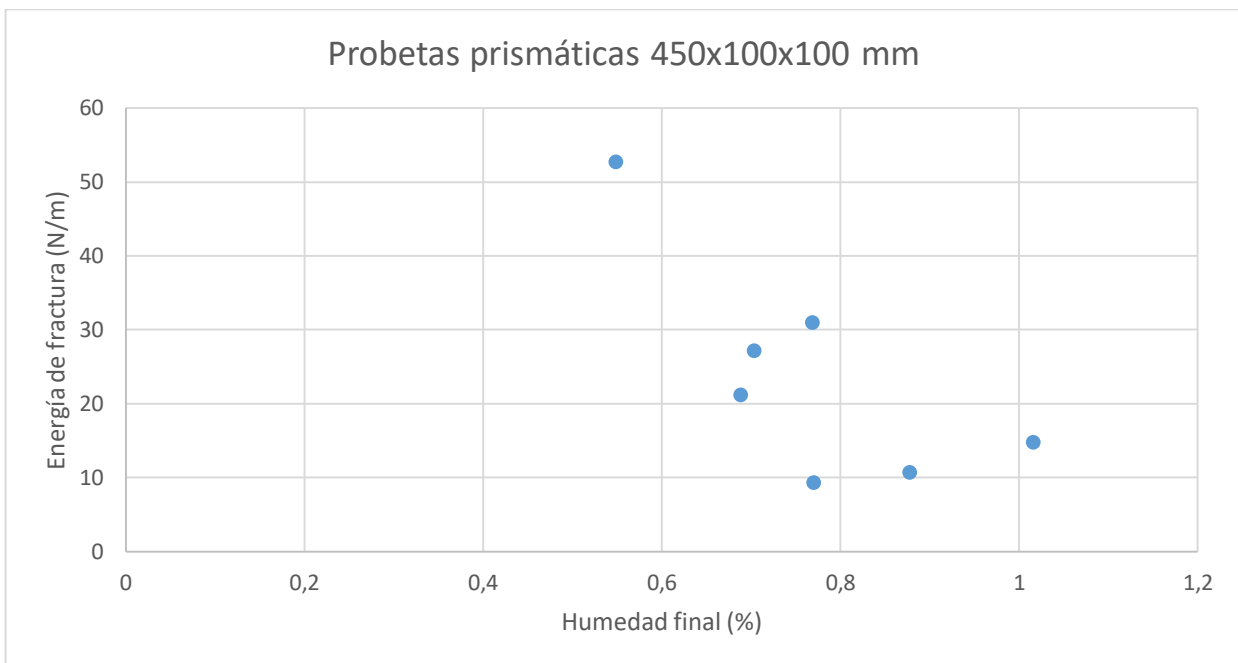


Ilustración 74: Energía de fractura por unidad de área Vs humedad final

### 7.5.4 Resistencia Vs densidad

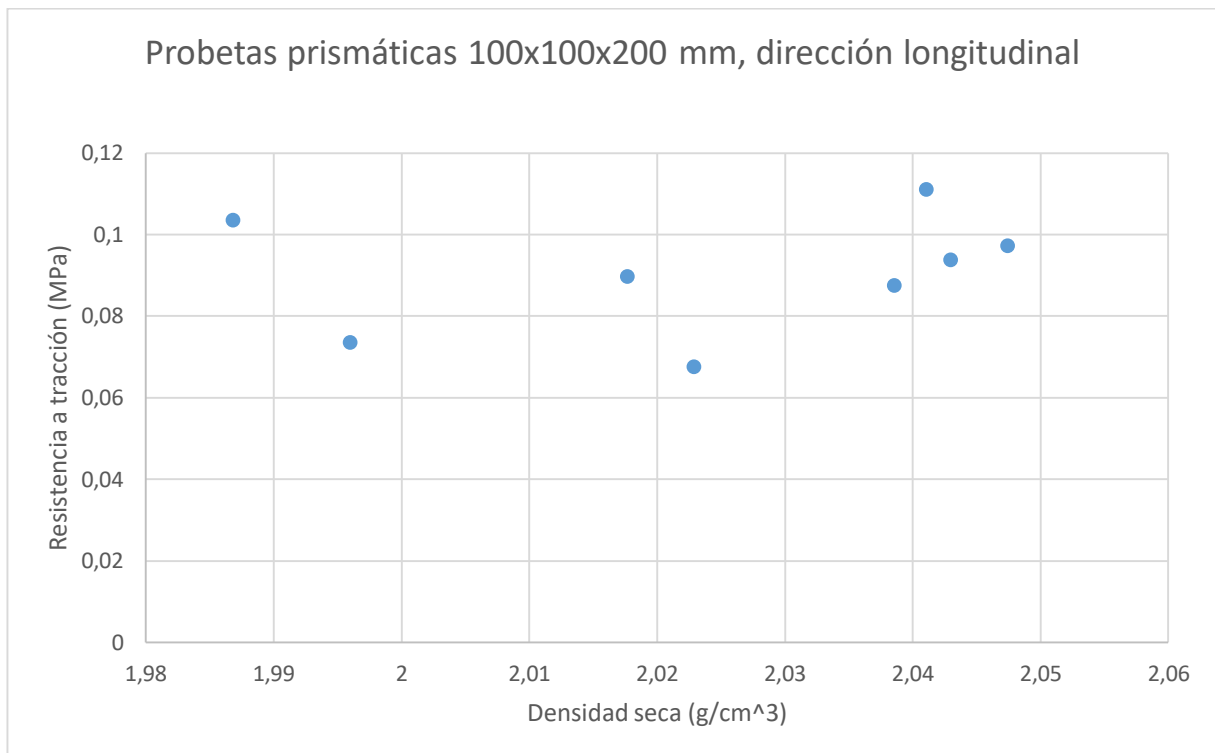


Ilustración 75: Resistencia a tracción Vs densidad seca (1)

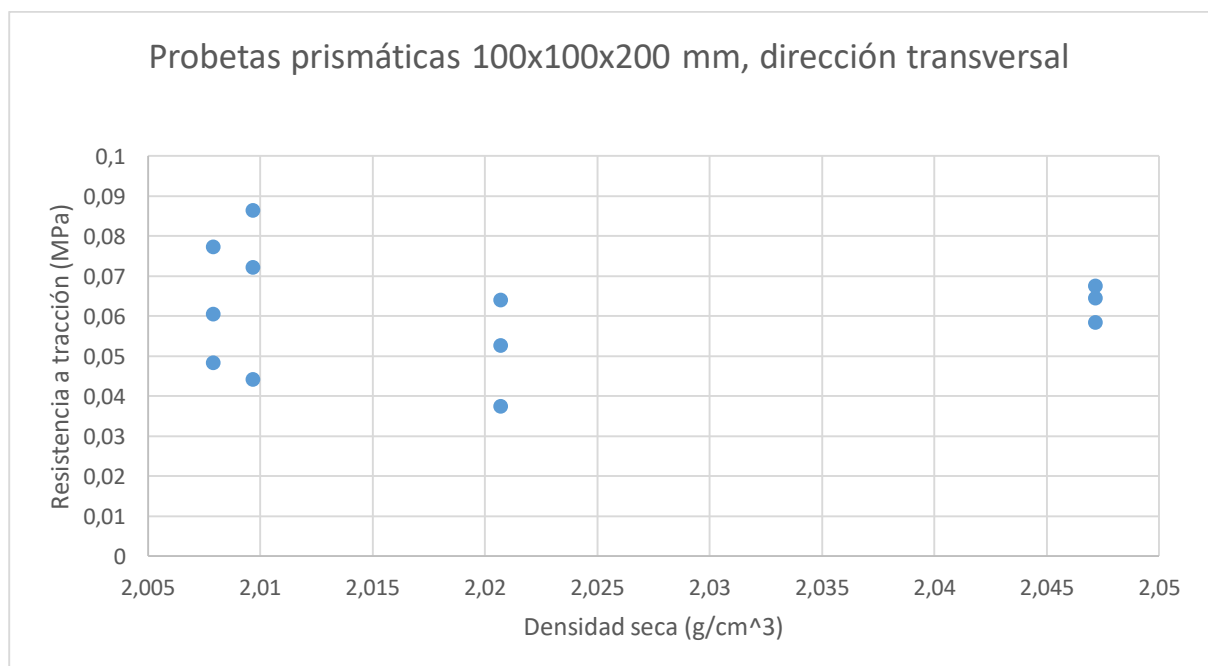


Ilustración 76: Resistencia a tracción Vs densidad seca (2)

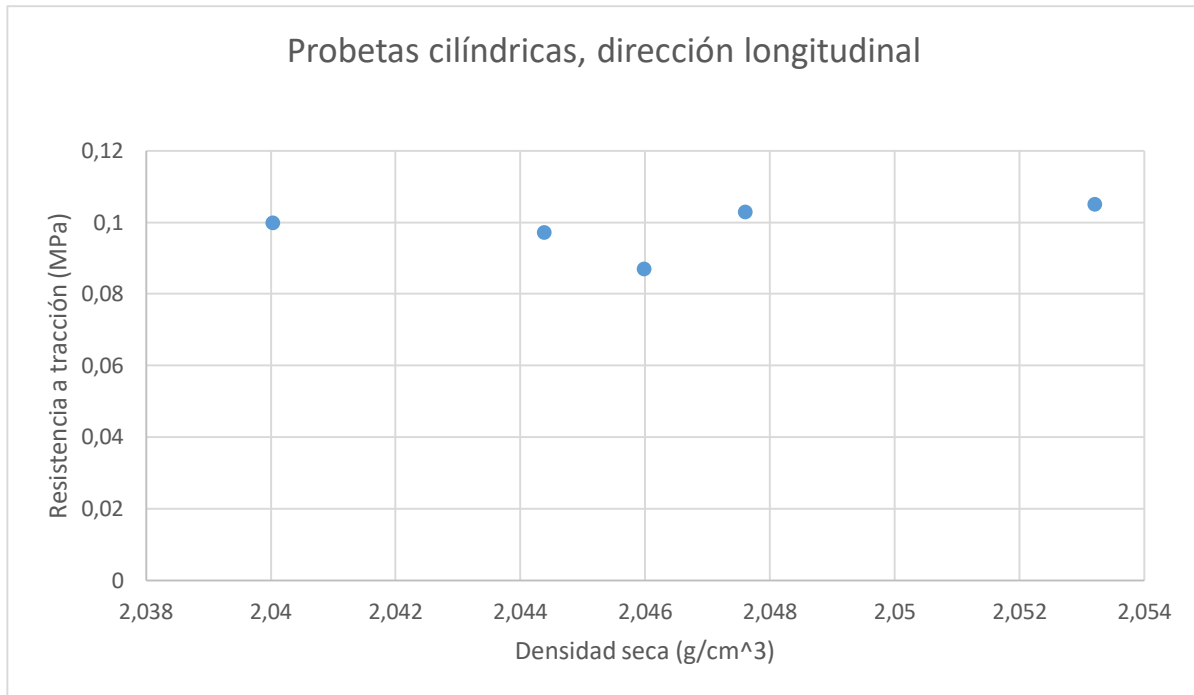


Ilustración 77: Resistencia a tracción Vs densidad seca (3)

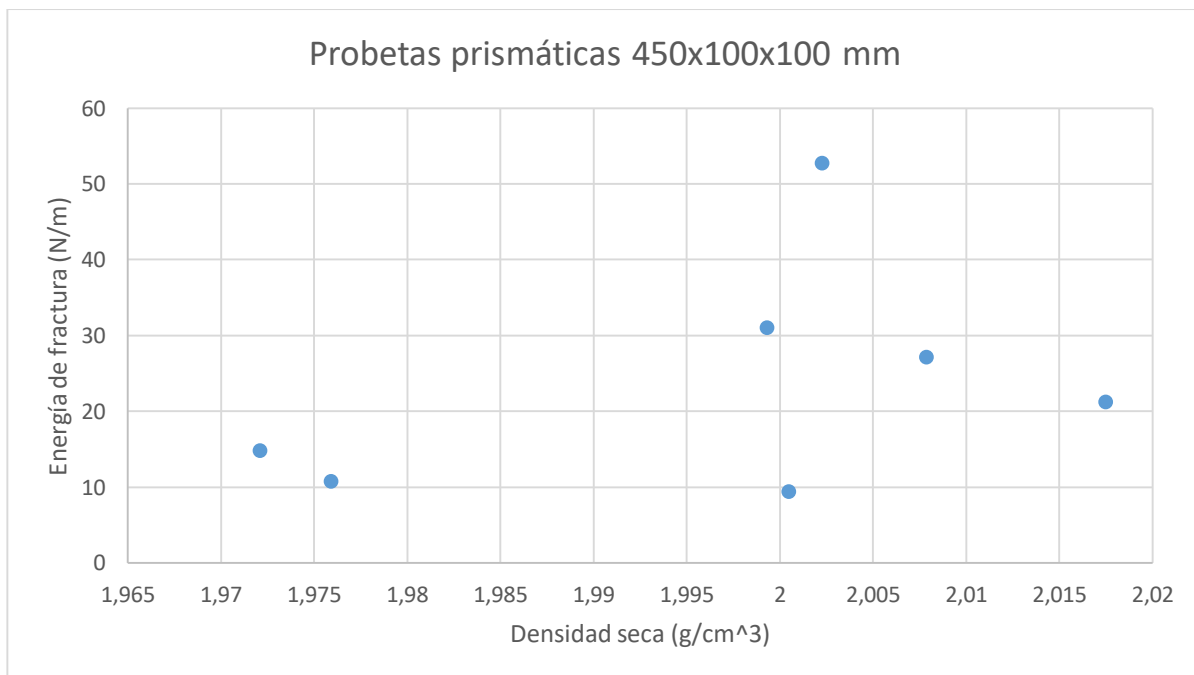


Ilustración 78: Energía de fractura por unidad de área Vs densidad seca

### 7.5.5 Resistencia Vs velocidad de ultrasonidos en la dirección de la tracción

La velocidad de ultrasonidos representada está tomada en la dirección de la tracción que provoca la fractura durante el ensayo, es decir, perpendicular al plano de fractura.

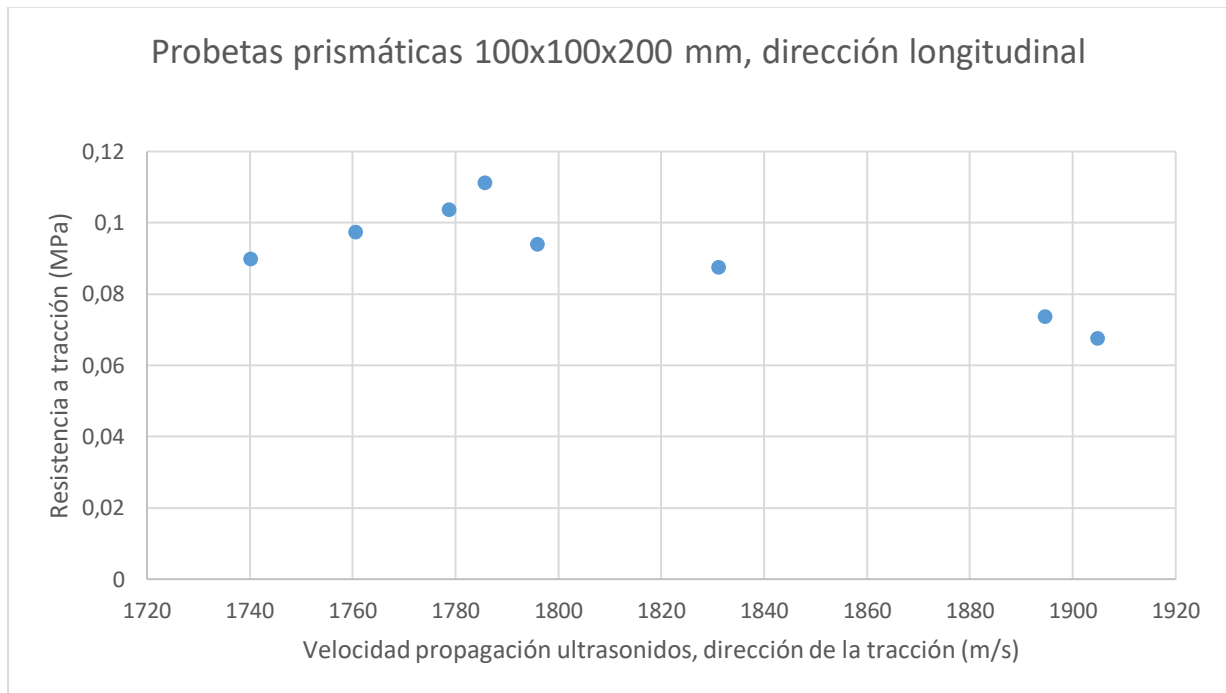


Ilustración 79: Resistencia a tracción Vs velocidad de propagación de ultrasonidos, dirección de la tracción (1)

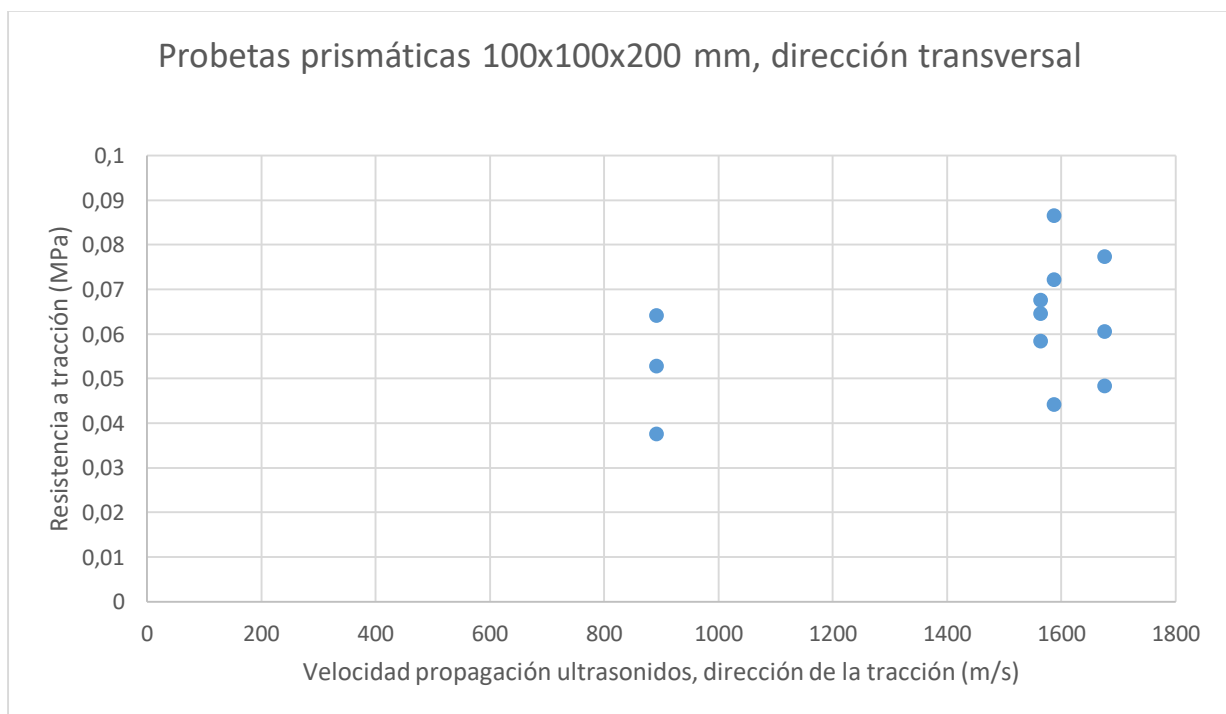


Ilustración 80: Resistencia a tracción Vs velocidad de propagación de ultrasonidos, dirección de la tracción (2)

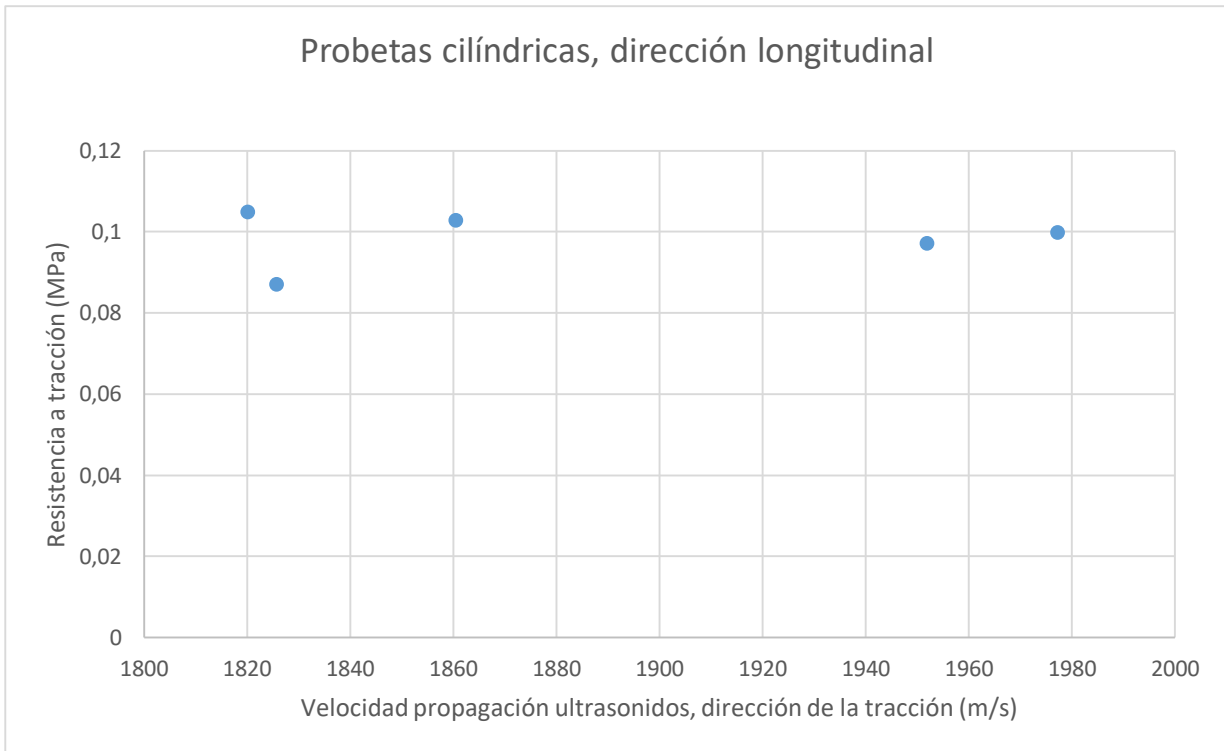


Ilustración 81: Resistencia a tracción Vs velocidad de propagación de ultrasonidos, dirección de la tracción (3)

### 7.5.6 Resistencia Vs velocidad de ultrasonidos en la dirección perpendicular a la tracción

La velocidad de ultrasonidos representada está tomada en la dirección perpendicular a la tracción que provoca la fractura durante el ensayo, es decir, contenida en el plano de fractura.

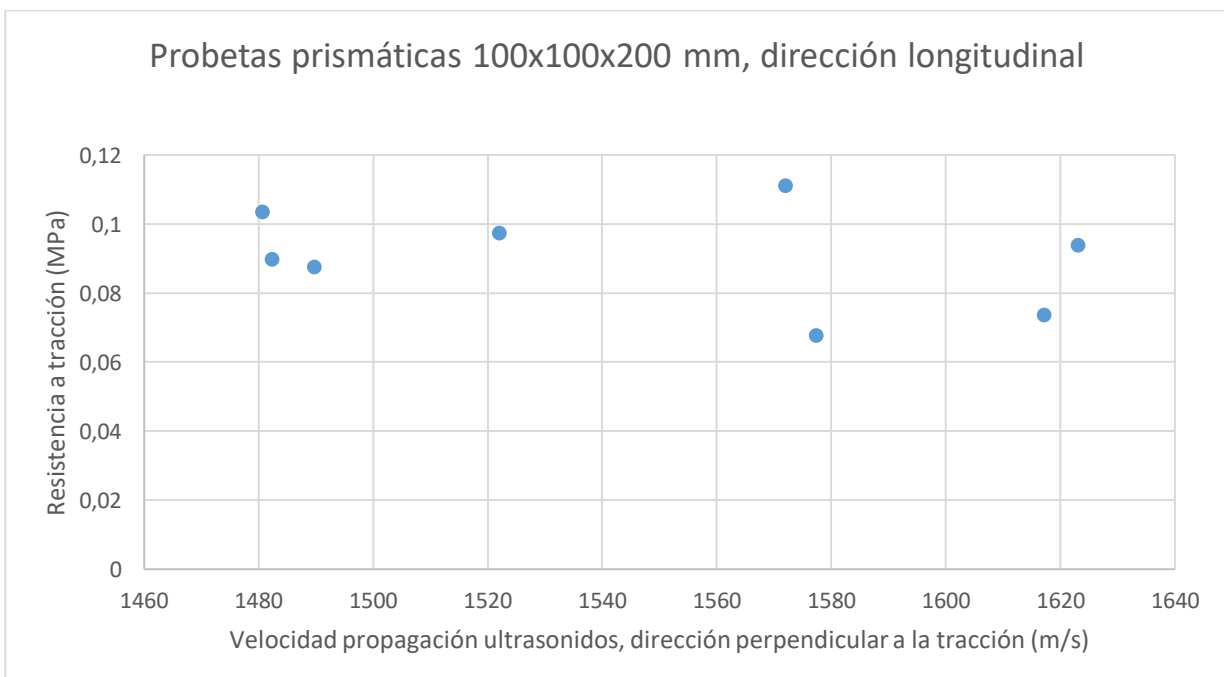


Ilustración 82: Resistencia a tracción Vs velocidad de propagación de ultrasonidos, dirección normal a la tracción (1)



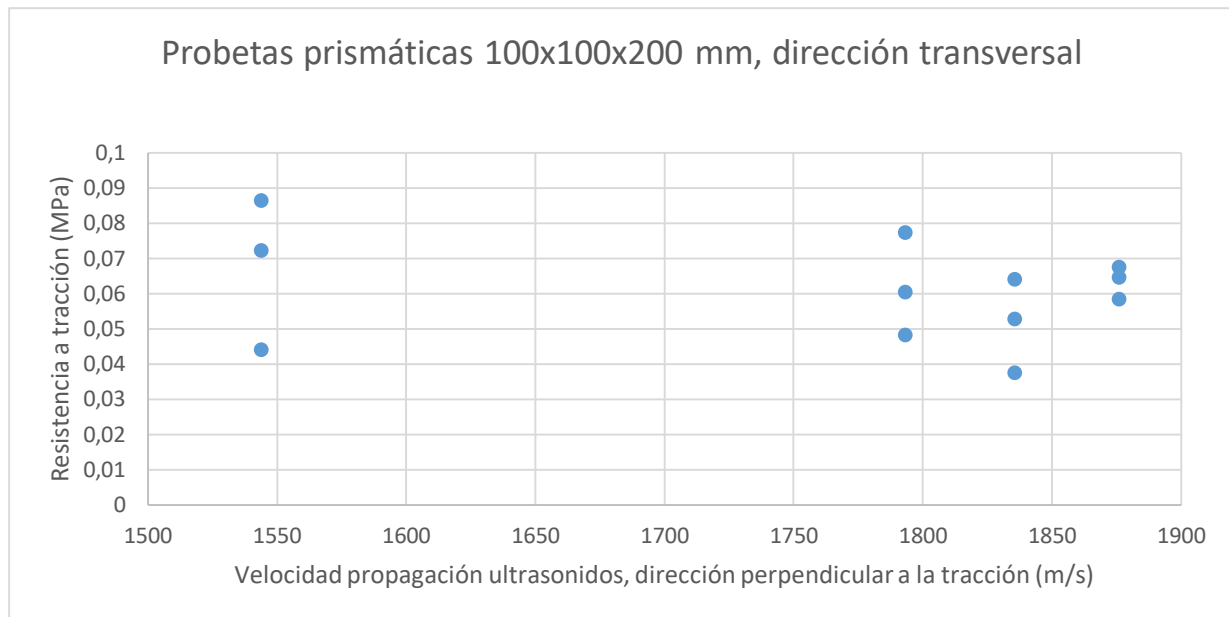


Ilustración 83: Resistencia a tracción Vs velocidad de propagación de ultrasonidos, dirección normal a la tracción (2)

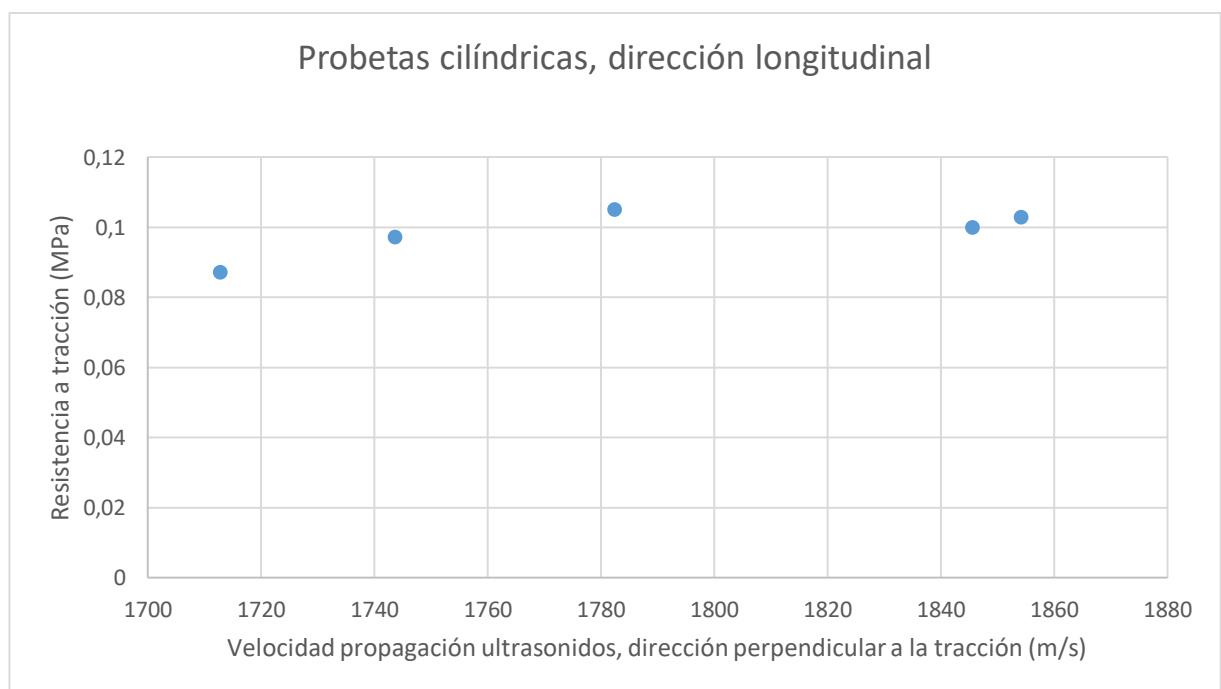


Ilustración 84: Resistencia a tracción Vs velocidad de propagación de ultrasonidos, dirección normal a la tracción (3)

### 7.5.7 Resistencia Vs edad de la probeta

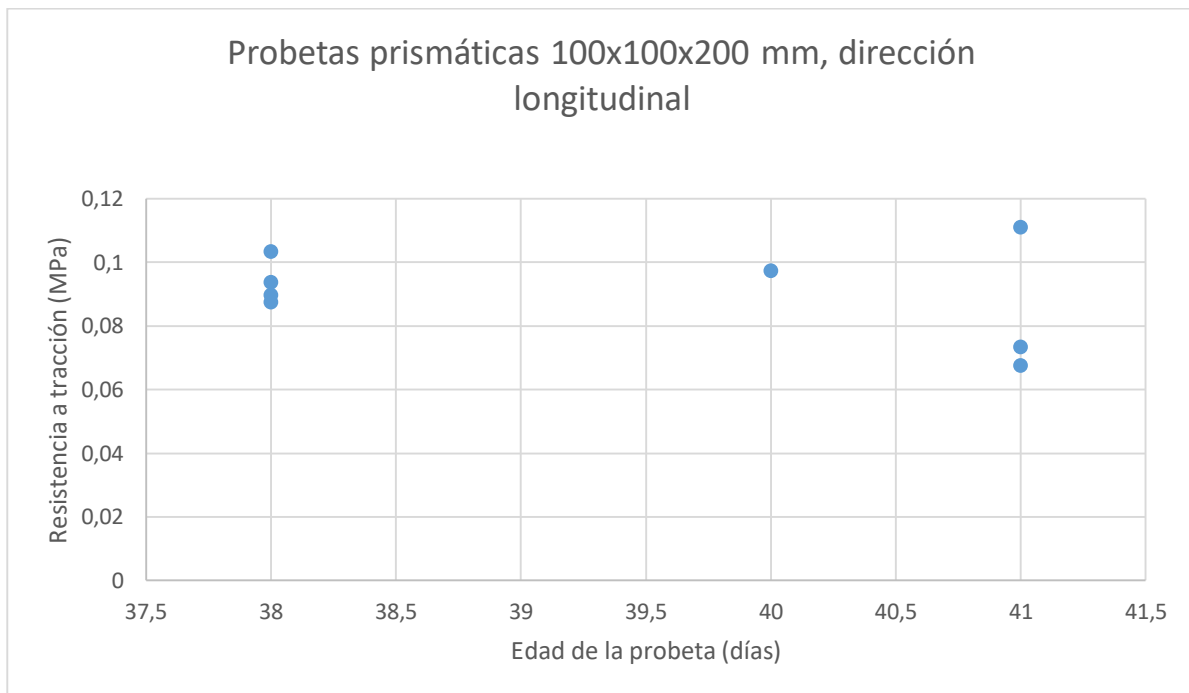


Ilustración 85: Resistencia a tracción Vs edad de la probeta (1)

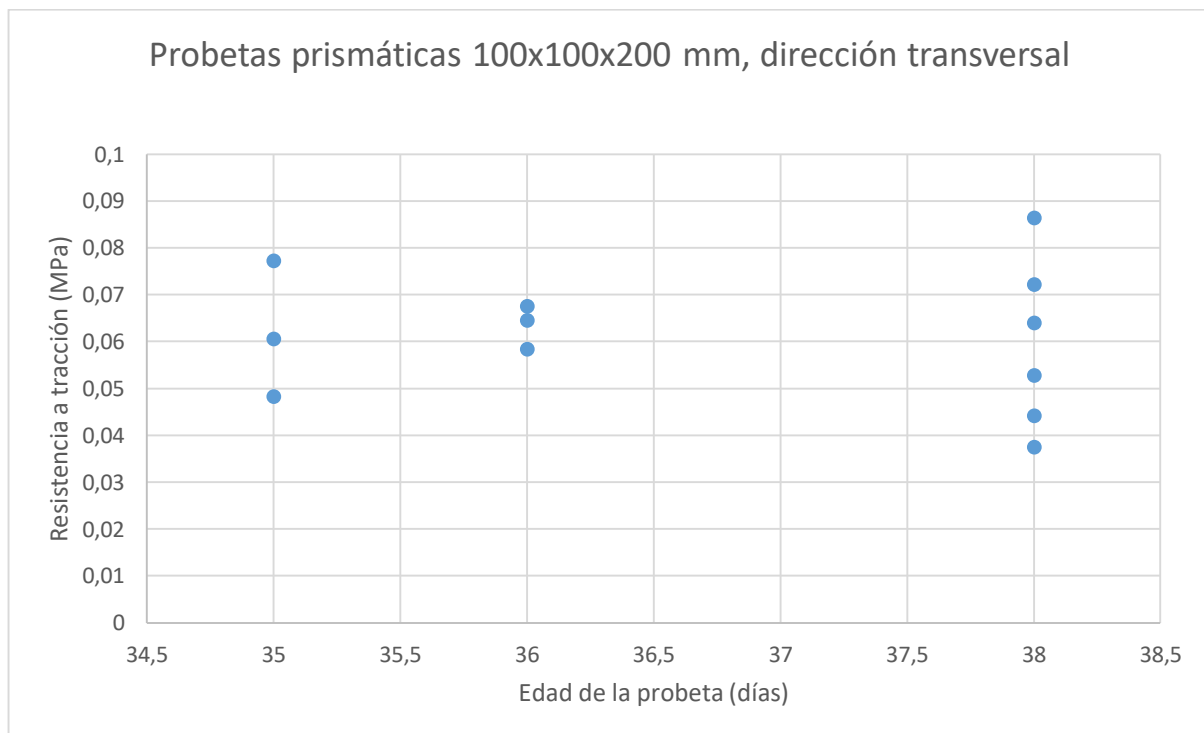


Ilustración 86: Resistencia a tracción Vs edad de la probeta (2)

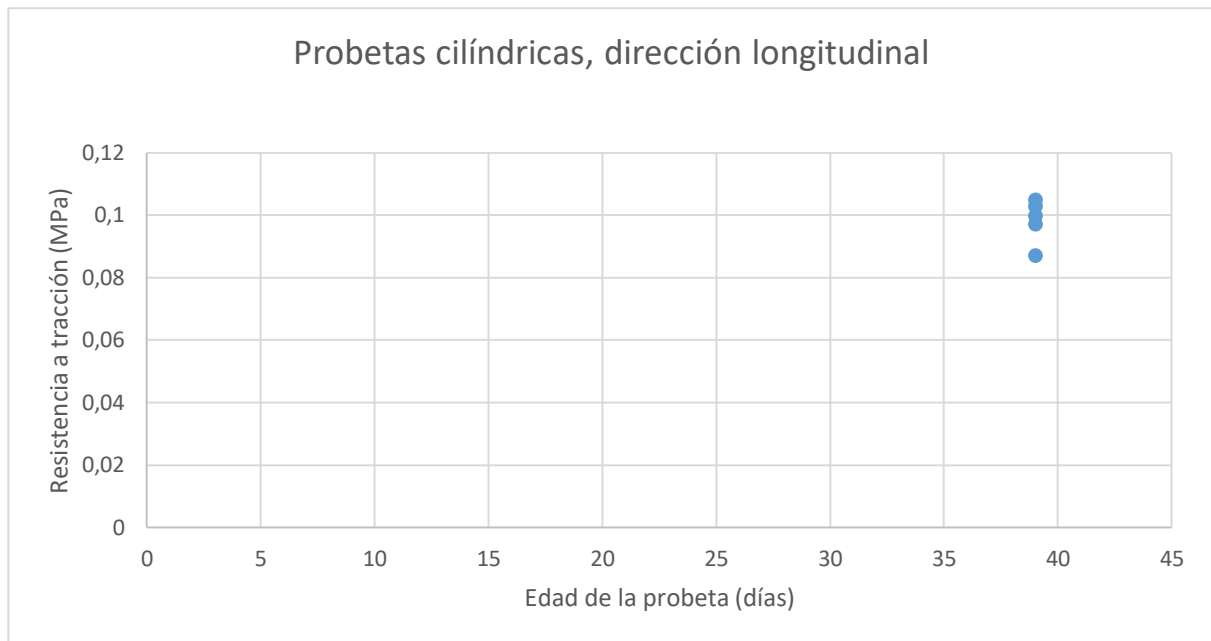


Ilustración 87: Resistencia a tracción Vs edad de la probeta (3)

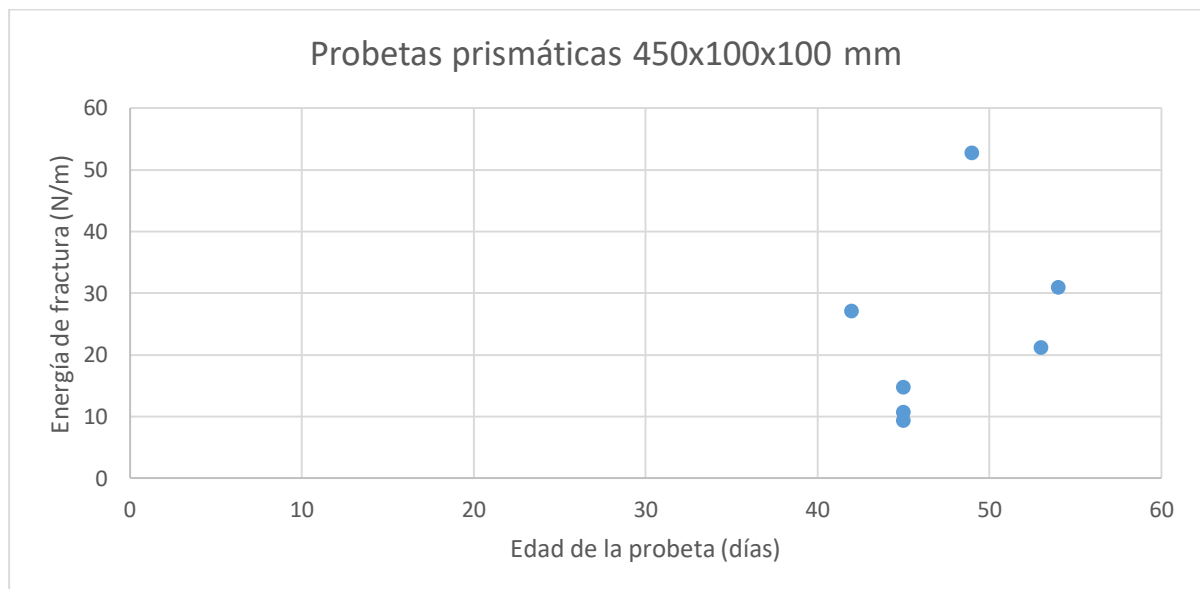


Ilustración 88: Energía de fractura por unidad de área Vs edad de la probeta

Tras la observación de las representaciones de la resistencia a tracción y la energía de fractura frente a las diferentes variables no se observa ninguna relación clara. Sin embargo, se podría realizar un estudio multivariable para determinar si existe una relación funcional entre la resistencia y algún determinado conjunto de variables.

Además, para que fuera posible concluir una relación funcional debería realizarse un barrido en un rango amplio de las variables.

## 8 CONCLUSIONES

---

**E**n este capítulo se recogen las conclusiones y observaciones referentes a la campaña experimental realizada. Además se recoge un resumen de los resultados obtenidos valorando su validez en función del cumplimiento de las hipótesis realizadas. Por último se proponen mejoras y líneas de investigación para la continuación de la campaña experimental.

### 8.1 Medición

El objetivo de la técnica TDR (Time Domain Reflectometry) para la medición de humedad desarrollado en el **apartado 5** es la creación de una herramienta que permita una medida in-situ de la humedad en obra a través de un ensayo no destructivo. El método de medida, aunque ha arrojado unos resultados prometedores, aún dista de ser un método fiable para la medición de humedad y sería necesario una calibración más detenida.

Las tres curvas de calibración realizadas coinciden con una diferencia marginal, sin embargo, la realización de calibraciones adicionales podría reducir notablemente el error cometido a la hora de interpretar las mediciones.

Cabe destacar que se debe realizar un número elevado de mediciones con el sensor Fieldscout TDR 150 y posteriormente realizar una media puesto que los valores arrojados para un mismo nivel de humedad presenta una dispersión considerable. Esto puede ser causado por la heterogeneidad de la mezcla, sin embargo podría deberse a la falta de precisión del equipo en cuyo caso debería plantearse la búsqueda de un equipo más preciso.

En caso de continuarse con el desarrollo de esta técnica de medida de la humedad in-situ sería recomendable realizar varias calibraciones más y determinar el número de medidas necesario para que la calibración arroje un valor fiable.

### 8.2 Fabricación

#### 8.2.1 Gradiente de las propiedades de las probetas

Durante la fabricación se observó una diferencia en el acabado superficial de las probetas, en la parte superior presentaban una superficie regular y pulida y dicha superficie se convertía en rugosa y porosa al aproximarse a la base de la probeta.

Además de esta observación se presentó un gradiente en la velocidad de propagación de ultrasonidos y un gradiente en la resistencia a tracción indirecta en la dirección de la compactación de las probetas.

Aunque no se han realizado las comprobaciones, es probable que exista un gradiente en la densidad de las probetas siendo esta mayor en la parte superior y decreciente hacia la base. Se podría realizar una comprobación simple cortando dos trozos de igual volumen de la parte superior e inferior y realizando el cálculo de la densidad.

El gradiente de las propiedades podría ser causado por un mayor movimiento relativo de las partículas situadas en la parte superior de la probeta, que ante la bajada del pisón tendrían mayor facilidad para rellenar los huecos entre partículas y así conseguir una mayor densidad.

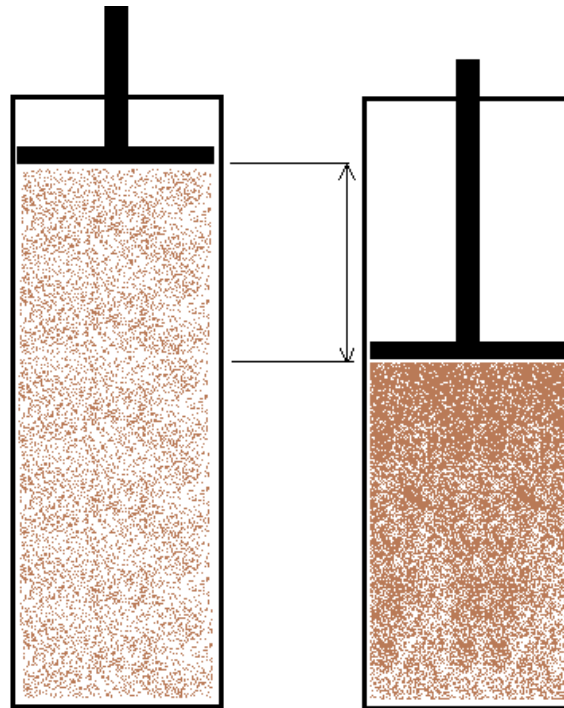


Ilustración 89: Gradiente de las propiedades de las probetas

En la imagen se observa cómo las partículas de la superficie experimentan un desplazamiento relativo mucho mayor que las partículas cercanas a la base, en las probetas prismáticas la bajada media del pisón fue de unos 120 mm una diferencia notable del desplazamiento que sufren las partículas de parte superior e inferior. Como caso extremo, las partículas en contacto con la base no sufren ningún desplazamiento vertical.

### 8.2.2 Energía de compactación estática Vs dinámica

Durante la fabricación se optó por la compactación estática con un actuador hidráulico, esta decisión se realizó por facilitar el proceso y tener una medida exacta de la energía aportada a cada probeta. Sin embargo en la técnica de construcción con tapia la energía de compactación se aplica de forma dinámica a través de impactos del pisón.

Queda por comprobar si una misma cantidad de energía aplicada de forma estática y dinámica produce los mismos resultados en densidad, para ello se podrían realizar probetas por ambos métodos y comparar los resultados.

### 8.2.3 Retracción de las probetas

La fabricación de las probetas tenía como objetivo una densidad lo más cercana a la obtenida en el ensayo próctor, para alcanzar esa densidad seca se controló la compactación en desplazamientos. Dichos cálculos para el control en desplazamiento se calcularon sobre el volumen de la probeta húmeda asumiendo que la retracción sería pequeña, como se observa en las dimensiones finales de las probetas la retracción es marginal y en algunas probetas inexistente.

Por tanto la hipótesis de que existiría poca retracción se cumple.

### 8.2.4 Control en carga

Como se observa en las curvas de compactación de las probetas, la pendiente y el área encerrada bajo cada

curva es muy similar. Además, para un incremento lineal del desplazamiento del actuador la fuerza crece con una tendencia exponencial por lo que un control en carga podría proporcionar mayor precisión. A diferencia del control en desplazamientos, donde una diferencia del recorrido del orden de 1 mm podría provocar una diferencia de la fuerza alcanzada en 3 kN con su consecuente aumento en la energía.

La compactación de la probeta P17 por control en carga arrojó resultados prometedores, se realizó un control a través de una rampa de carga con valor máximo igual al valor alcanzado para las probetas fabricadas con control en desplazamiento. Como resultado se obtuvo una probeta con las dimensiones deseadas y la misma densidad.

Por esta razón se considera que el control en carga puede ser más preciso.

### 8.2.5 Desgaste de los moldes

Tras la fabricación de unas 10 probetas, los moldes de madera comenzaron a presentar arañazos en las paredes interiores llegando incluso a veces a aparecer trozos de árido grueso incrustados en la madera.

Con el uso continuado este problema se agravó, llegando a aparecer arañazos de 2 a 3 mm de profundidad que interferían en el acabado superficial de las probetas y de los que se desprendían trozos de la fibra de la madera que quedaban adheridos a su superficie y fue necesario retirar a posteriori.

Para campañas futuras se recomienda encarecidamente el uso de moldes metálicos que proporcionan un mejor acabado superficial, no sufren desgaste y presentan menos desviación en la geometría de las probetas.

## 8.3 Resultados

### 8.3.1 Comparación resistencia a tracción indirecta con resistencia a compresión

Al tratarse del mismo material y del mismo proceso de fabricación se puede comparar la resistencia a tracción con la resistencia a compresión simple obtenidas en el TFG de Isabel Rodríguez Jiménez [1].

La media de la resistencia a compresión de las probetas prismáticas es 1,046453705 MPa y la media de la resistencia a tracción indirecta es 0,090242747 MPa, un 8,62 % de la resistencia a compresión.

La media de la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas es 1,770433225 MPa y la media de la resistencia a tracción indirecta es 0,098447969 MPa, un 5,56% de la resistencia a compresión.

### 8.3.2 Comparación con la bibliografía

Con el fin de comparar se procede a mostrar los resultados de una campaña experimental de características similares recogida en una investigación financiada por la Fundación Mapfre en 2007, *Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento* [2].

En dicha campaña se ensayaron a compresión simple probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro de una geometría similar a las cilíndricas utilizadas en esta campaña.



Ilustración 90: Ensayo de compresión simple, *Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento* [2]

Se procede a mostrar un resumen de la tierra que proporcionó mejores propiedades a compresión.

La tabla siguiente muestra la granulometría de la Tierra TIII utilizada en dicha campaña:

Tabla 18: Granulometría, *Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento* [2]

Ensayo de Granulometría Tierra TIII  
Peso de la muestra = 1.354 gr.

Tamiz	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
19,1	0	0,00	0	100,00
9,52	0	0,00	0,00	100,00
4,76	50	3,69	3,69	96,31
2,00	136	10,04	13,74	86,26
0,42	560	41,36	55,10	44,90
0,075	294	21,71	76,81	23,19
FONDO	314	23,19	100,00	0,00
PESO MUESTRA	1354			

Pasa el Tamiz 0,075 mm más del 12% y menos del 50%

Según el *Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS)* [8] la composición de la tierra sería:

- **Grava:** 0%
- **Arena:** 76.81%
- **Finos:** 23.19%

Sobre esa misma tierra se realizaron ensayos proctor aplicando una compactación estática de 8 kg/cm<sup>2</sup> cuyo resultado se muestra a continuación.

Tierra TIII – Energía aplicada = 8 kg/cm<sup>2</sup>

Suelo	Pesafiltros		Peso mue- st. húm.	Peso mue- st. Seca	H	Peso molde	Peso muestra c/ molde	Volumen molde	Peso Unitario Húmedo	Peso Unitario Seco	% H agreg
	Nº	Peso									
TIII	13	34,2	70,5	64,7	19,02	4235	5911	1000	1,676	1,40821	6
	10	34,7	65,7	60,2	21,57	4235	6002	1000	1,767	1,45350	8
	1	34,9	76,2	67,9	25,15	4235	6073	1000	1,838	1,46862	11
	1	34,9	78,3	68,4	29,55	4235	5989	1000	1,754	1,35389	12

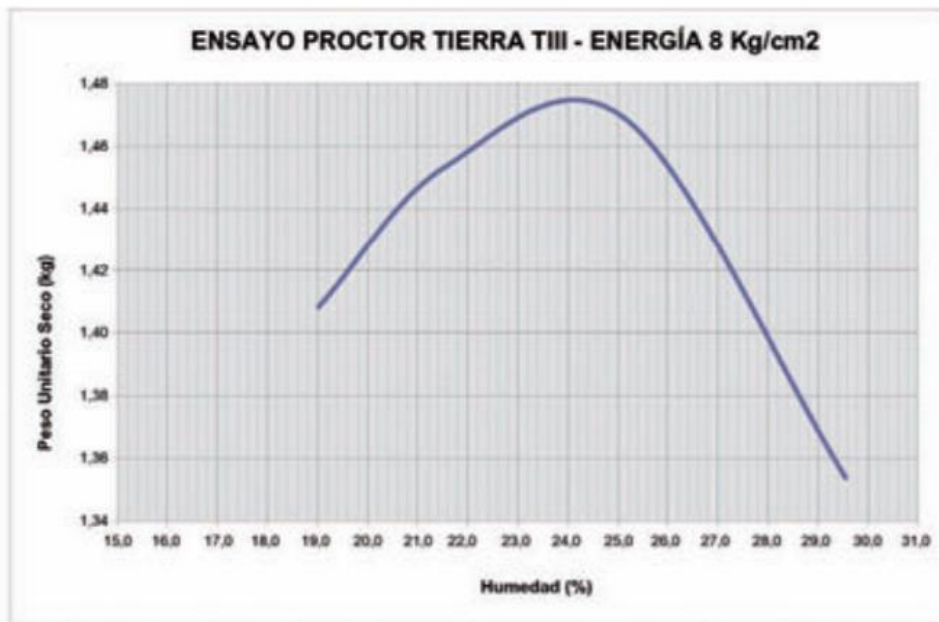


Ilustración 91: Ensayo proctor, *Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento* [2]

Una vez recogida las características de las probetas utilizadas se muestran los resultados a compresión simple:

**5.8.2. Ensayo a la compresión de probetas de Tierra TIII de 8 kg/cm<sup>2</sup>**

Probeta	peso específico	factor	Divisiones	Fuerza (Kg)	tensión (kg/ cm <sup>2</sup> )	Tensión media de rotura	Densidad media
1	1,63	15,06	219,00	3298,14	41,23		
2	1,61	15,06	226,00	3403,56	42,54		
3	1,59	15,06	218,00	3283,08	41,04		
4	1,62	15,06	255,00	3840,30	48,00		
5	1,62	15,06	245,00	3689,70	46,12		
6	1,62	15,06	237,00	3569,22	44,62		
	9,69				263,55	<b>43,93</b>	1,614

Tensión Media de Rotura 43,93 Kg/cm<sup>2</sup>

Ilustración 92: Resistencia a compresión simple, *Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento* [2]

La tensión de rotura media de las probetas fue de 43,93 kg/cm<sup>2</sup>, equivalentes a 4,31 MPa.

La fuerza de compactación por unidad de área fue de 8 kg/cm<sup>2</sup>, equivalentes a 0,7845 MPa.

Por otro lado, las probetas realizadas en esta campaña experimental y ensayadas en el TFG de Isabel Rodríguez Jiménez [1] presentaron una resistencia media a compresión de 1,770433225 MPa aplicándose una fuerza de compactación durante su fabricación de 32,47527273 kN, equivalentes a una presión de 4,1334 MPa.

Estos resultados muestran una gran diferencia ya que en esta campaña aplicándose una presión de compactación 5,26 veces superior a la aplicada en el estudio de *Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento* [2] se han conseguido sólo un 41% de la resistencia a compresión.



Se puede establecer una relación entre la resistencia a compresión y la resistencia tracción de materiales frágiles como el hormigón y la tapia, siendo un valor aproximado de la resistencia a tracción del 10% de la resistencia a compresión.

Por tanto se infiere que las probetas ensayadas en el estudio del Dr. Fernando Galíndez [2] también tendrían una mayor resistencia a tracción que las ensayadas en esta campaña experimental.

Las principales diferencia entre el material utilizado en ambas campañas es la granulometría y la humedad de fabricación. Las probetas ensayadas en la campaña del Dr. Fernando Galíndez [2] presenta una completa ausencia de grava y una mayor presencia de finos que las utilizadas en esta campaña, asimismo presentan una humedad 4 veces mayor.

Cabría revisar para campañas futuras la granulometría del material utilizado así como la humedad de fabricación con el fin de intentar replicar resultados similares de resistencia compresión.

## 8.4 Líneas de investigación futura

Como líneas de investigación futuras se propone el ensayo de probetas de mayor tamaño de tal manera que el tamaño del árido sea menor en relación con el tamaño de la probeta.

En cuanto a la fabricación de las probetas se propone la fabricación por tongadas simulando las características finales de la construcción en obra, y así intentar reducir el gradiente de las propiedades que en esta campaña se han observado.

Se propone también la comparación de forma somera de las características de un grupo pequeño de probetas realizadas mediante compactación estática frente a otro realizado de forma tradicional con pisón manual aportando en ambos grupos el mismo nivel de energía.

En cuanto al material se propone el estudio exhaustivo de las propiedades de partida, granulometría y humedad.



# REFERENCIAS

---

- [1] I. Rodríguez Jiménez, *Caracterización del comportamiento a compresión simple sobre probetas de tapia*, 2018.
- [2] D. F. Galíndez, *Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento*, Universidad Católica de Salta, 2007.
- [3] J. G. Bermudo, *Caracterización experimental del comportamiento del adobe frente a cargas de compresión simple*, 2016.
- [4] I. d. Oteiza, *Arquitectura y Construcción con tierra, Tradición e Innovación.*, 2002.
- [5] D. De Sensi, *Terracruda, La Diffusione Dell'architettura Di Terra*, 2003.
- [6] U. 41410, *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques.*, 2008.
- [7] UNE 103-105-94: *Ensayo de Compactación. Próctor Normal.*
- [8] *Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS).*
- [9] «Standards Australia,» 2002.
- [10] I. E. T. Piet- 70, «Prescripciones sobre Obras de Fábrica».
- [11] «UNE 103-300, Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa,» 1993.
- [12] UNE-EN 12504-4(AENOR 2004), 2004.
- [13] UNE-EN 12390-6: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas.*
- [14] RILEM, *RILEM TC 50-FMC Draft Recommendation.*
- [15] D. C. F. y. V. S. G. F. Gálvez Díaz-Rubio, *Modelización numérica de la fractura en Ensayos Brasileños de materiales cerámicos a alta velocidad de deformación*, Departamento de Ciencia y Materiales E.T.S.I. Caminos Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, 2003.