

Trabajo Fin de Máster

Diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica

Tapia con residuo de vidrio incorporado y estabilizadas con cal: inspección por ultrasonidos y caracterización de resistencia a compresión

Autor: Joseba García Román

Tutores: Mario Solís Muñiz y José Daniel Rodríguez Mariscal

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

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Máster
Diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica

**Tapia con residuo de vidrio incorporado y
estabilizadas con cal: inspección por ultrasonidos y
caracterización de resistencia a compresión**

Autor:

Joseba García Román

Tutor:

Mario Solís Muñiz

José Daniel Rodríguez Mariscal

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Máster: Tapia con residuo de vidrio incorporado y estabilizadas con cal: inspección por ultrasonidos y caracterización de resistencia a compresión

Autor: Joseba García Román

Tutor: Mario Solís Muñiz

José Daniel Rodríguez Mariscal

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

En primer lugar, quiero dar las gracias a todas las personas que me han acompañado en esta etapa de mi vida especialmente a mi familia y compañeros con los que he compartido buenos y malos momentos, pero los cuales me han hecho llegar hasta donde estoy hoy en día.

Agradecer a todos los profesor, mentores y personas que me han brindado sus conocimientos y tiempo permitiéndome así seguir creciendo como profesional y como persona.

También quiero hacer un especial agradecimiento a Mario Solís Muñoz y José Daniel Rodríguez Mariscal por haberme dado la oportunidad de embarcarme en este bonito proyecto. Vuestra bondad, entrega y pasión por vuestro trabajo ha hecho que este proyecto haya sido una experiencia la cual he disfrutado mucho y de la que me llevo muchos aprendizajes. También quiero agradecer a mi compañero de proyecto Manuel Antonio Gallardo Navarro por el compañerismo, entrega y dedicación que ha mostrado durante todo el proyecto.

Agradecer también a la Universidad de Sevilla por las instalaciones, facilidades y posibilidades que nos han aportado para poder sacar este proyecto adelante, agradeciendo también la colaboración del departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la ETSI de Ingeniería de Edificación de Sevilla.

Joseba García Román

Sevilla, 2023

Resumen

La tierra como material de construcción ha sido utilizada desde la prehistoria hasta nuestros días. Debido a su bajo costo y fácil producción; sin materiales de alta energía incorporados, hacía de la tierra un material idóneo para la construcción de los hogares. Este tipo de construcciones no se empleaban exclusivamente para el uso de viviendas sino que a lo largo de la historia también se han construido numerosos monumentos históricos que hoy en día se pueden seguir contemplando.

En estas últimas décadas, la disminución de los recursos naturales y el aumento de residuos ha hecho que el ser humano tenga una mayor conciencia del impacto que este tipo de situaciones está teniendo en el medio ambiente. Es por ello, que el departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la ETSI de la universidad de Sevilla, se ha planteado aprovechar la línea de investigación de mejora del conocimiento del comportamiento mecánico de la tierra como material de construcción para estudiar el efecto que tendría el incorporar residuo de vidrio con cal en la tapia. El uso del vidrio triturado como alternativa a la arena tradicional o áridos naturales, supondría de manera indirecta un doble beneficio ayudando a combatir el agotamiento natural de la arena y la reducción del vidrio de desecho.

Este proyecto presenta diferentes estudios sobre el comportamiento de la tapia con residuo de vidrio incorporado. En este documento se explica desde el proceso de fabricación de los especímenes, los ensayos realizados, hasta el análisis de los resultados obtenidos.

Esta campaña experimental se ha centrado principalmente en dos tipos de ensayos. El ensayo de ultrasonidos, que es de carácter no destructivo y el ensayo a compresión simple. Para los ensayos de ultrasonidos se ha realizado el estudio de los gradientes de compactación por probeta, la influencia del paso del tiempo en los especímenes y una comparativa entre las muestras con vidrio y sin vidrio. Por otro lado, para los ensayos de compresión, se ha analizado la influencia que posee la posición en el molde durante el proceso de fabricación, la influencia de la edad en la resistencia de las probetas, la evolución de la humedad respecto al tiempo, la evolución de la resistencia respecto a la humedad, los resultados obtenidos de la prueba de carbonatación y una comparativa entre las muestras con vidrio y sin vidrio.

Abstract

Earth as a building material has been used from prehistoric times to the present day. Because it is cheap and easy to produce, without the use of energy-intensive materials, it made earth an ideal material for the construction of homes. This type of construction was not only used for houses, but throughout history many historical monuments have also been built which can still be seen today.

In recent decades, the decrease in natural resources and the increase in environmental waste has made human beings more aware of the impact that this type of situation is having on the environment. For this reason, the Department of Mechanics of Continuous Media and Theory of Structures of the ETSI of the University of Seville has decided to take advantage of the line of research to improve knowledge of the mechanical behaviour of earth as a construction material to study the effect of incorporating environmental waste glass with lime in the wall. The use of crushed glass as an alternative to traditional sand or natural aggregates would indirectly provide a double benefit by helping to combat the natural depletion of sand and the reduction of waste glass.

This project presents different studies on the behaviour of the wall with incorporated waste glass. This document explains the manufacturing process of the specimens, the tests carried out and the analysis of the results obtained.

This experimental campaign focused mainly on two types of tests. The ultrasonic test, which is non-destructive, and the simple compression test. For the ultrasonic tests, the study of the compaction gradients per specimen, the influence of the passing of time on the specimens and a comparison between the specimens with and without glass were carried out. On the other hand, for the compression tests, the influence of the position in the mold during the manufacturing process, the influence of age on the strength of the specimens, the evolution of humidity with respect to time, the evolution of strength with respect to humidity, the results obtained from the carbonation test and a comparison between the specimens with glass and without glass have been analysed.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	x
Índice	xi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xiv
1 Introducción	1
1.1 <i>Tierra como material de construcción</i>	1
1.1.1 Adobe	2
1.1.2 Tapia	2
1.1.3 BTC	3
1.1.4 Tierra ensacada	3
1.1.5 COB	4
1.2 <i>Antecedentes</i>	5
1.3 <i>Interés</i>	7
1.4 <i>Objetivos del proyecto</i>	8
2 Revisión del estado del arte	9
3 Propiedades del suelo	11
4 Procedimiento de fabricación	13
4.1 <i>Tipología de probeta</i>	14
4.2 <i>Nomenclatura</i>	15
4.3 <i>Descripción del molde</i>	16
4.4 <i>Mezclado de componentes</i>	17
4.5 <i>Humedad de fabricación</i>	18
4.6 <i>Procedimiento de compactación</i>	20
4.7 <i>Densidad y porosidad</i>	22
5 Descripción de los ensayos	24
5.1 <i>Ensayos de ultrasonidos</i>	24
5.1.1 Marco teórico	24
5.1.2 Descripción del equipo de medida	25
5.1.3 Procedimiento de ensayo	25
5.2 <i>Ensayos de compresión</i>	28
5.2.1 Marco teórico	28
5.2.2 Descripción del equipo de medida	29
5.2.3 Procedimiento de ensayo	30

6	Resultados ensayos ultrasonidos	32
	<i>6.1. Estudio de gradientes de compactación por probeta</i>	32
	<i>6.2. Estudio influencia edad</i>	38
	<i>6.3. Comparación con/sin vidrio</i>	44
7	Resultados ensayos compresión	47
	<i>7.1. Influencia de la posición en el molde durante la fabricación</i>	47
	<i>7.2. Estudio influencia edad en la resistencia de probetas</i>	50
	<i>7.3. Evolución de la humedad con respecto al tiempo</i>	52
	<i>7.4. Evolución de la resistencia respecto a la humedad</i>	55
	<i>7.5. Comparación con/sin vidrio</i>	58
	<i>7.6. Carbonatación de cal</i>	60
8	Conclusiones	62
	<i>8.1. Resumen del alcance del proyecto</i>	62
	<i>8.2. Conclusiones sobre los resultados de los ensayos</i>	63
	<i>8.3. Desarrollos futuros</i>	65
9	Referencias	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Granulometría de las probetas	11
Tabla 2. Proporción de tipos de vidrio (en peso)	11
Tabla 3. Tamices utilizados con el correspondiente porcentaje de vidrio	12
Tabla 4. Número de probetas ensayadas	13
Tabla 5. Días de referencia para realizar los ensayos junto con los días reales.	13
Tabla 6. Datos del estudio de densidad y porosidad	22
Tabla 7. Muestra poblacional de los ensayos de ultrasonidos.	32
Tabla 8. Medidas zona no carbonatada de las probetas de 120 días.	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. La Alhambra, Granada.	1
Figura 2. Bloques de Adobe.	2
Figura 3. Encofrado y muro de tapia.	2
Figura 4. Bloque de Tierra Comprimida.	3
Figura 5. Casa construida con tierra ensacada.	3
Figura 6. Construcción con COB.	4
Figura 7. Granulometría 35% Vidrio grueso triturado y 65% Vidrio medio triturado	12
Figura 8. Dimensiones de las probetas.	14
Figura 9. Código de identificación.	15
Figura 10. Molde utilizado en el proceso de fabricación	16
Figura 11. Disposición de las probetas dentro del molde.	16
Figura 12. Mezcla de componentes en seco sin vidrio.	17
Figura 13. Proceso de mezcla de componentes.	17
Figura 14. Ensayo Proctor normal	18
Figura 15. Estufa para el secado de probetas.	19
Figura 16. Proceso de secado mediante sartén.	19
Figura 17. Proceso de compactación.	20
Figura 18. Molde sin pared lateral.	21
Figura 19. Proceso de refrentado	22
Figura 20. Equipo de medida Pundit Lab.	25
Figura 21. Planos ortogonales de medición que conforman la probeta.	26
Figura 22. Demostración de la colocación del emisor y receptor en el ensayo directo.	26
Figura 23. Esquema de puntos de medida ensayo tomográfico.	27
Figura 24. Diagrama tensión-tiempo para determinar el ensayo a compresión.	28
Figura 25. Máquina utilizada para los ensayos de compresión.	29
Figura 26. Patrones de medida junto con el adhesivo utilizado.	30
Figura 27. Proceso del ensayo destructivo.	31
Figura 28. Velocidades de 30 días, diferenciado por probeta y tipología.	33
Figura 29. Velocidades de 60 días, diferenciado por probeta y tipología.	34
Figura 30. Velocidades de 90 días, diferenciado por probeta y tipología.	35
Figura 31. Velocidades de 120 días, diferenciado por probeta y tipología.	36

Figura 32. Graficas del punto 1 – 6 con vidrio de la evolución de la velocidad con respecto al tiempo, siendo la línea roja la mediana y las líneas azules los percentiles 25 y 75.	39
Figura 33. Graficas del punto 7 – 12 con vidrio de la evolución de la velocidad con respecto al tiempo, siendo la línea roja la mediana y las líneas azules los percentiles 25 y 75.	40
Figura 34. Graficas del punto 1 – 6 sin vidrio de la evolución de la velocidad con respecto al tiempo, siendo la línea roja la mediana y las líneas azules los percentiles 25 y 75.	41
Figura 35. Graficas del punto 7 – 12 con vidrio de la evolución de la velocidad con respecto al tiempo, siendo la línea roja la mediana y las líneas azules los percentiles 25 y 75.	42
Figura 36. Gráficas con diagramas de cajas que representan la velocidad por punto de medida.	45
Figura 37. Influencia de la posición en el molde en la resistencia de las probetas.	48
Figura 38. Influencia de la edad en la resistencia de probetas con vidrio	51
Figura 39. Influencia de la edad en la resistencia de probetas sin vidrio	51
Figura 40. Evolución de la humedad con respecto del tiempo.	52
Figura 41. Registro de temperatura y humedad durante toda la experimentación.	53
Figura 42. Evolución de la resistencia con respecto a la humedad.	56
Figura 43. Comparativa de la resistencia entre las probetas con vidrio y sin vidrio.	58
Figura 44. Ensayo carbonatación para la probeta SV-M3-P3-T	60
Figura 45. Ensayo carbonatación para la probeta CV-M1-P1-T	60

1 INTRODUCCIÓN

Las primeras civilizaciones repartidas en distintas regiones del mundo poseían una característica común, sus condiciones climáticas era muy similares siendo este un clima cálido y templado. Los ríos ofrecían facilidades de transporte y de riego que favorecía a la agricultura. Por consiguiente, los valles de ríos como Éufrates y el Tigris en Mesopotamia o el Nilo en Egipto, ofrecían condiciones ideales para las ciudades de las primeras civilizaciones.

En los vestigios de estas civilizaciones que se han conseguido conservar y en diversos descubrimientos arqueológicos, se demuestra que la tierra fue el principal material de construcción, no solamente para la construcción de viviendas sino tanto de fortalezas como de monumentos religiosos.



Figura 1. La Alhambra, Granada.

1.1 Tierra como material de construcción

La tierra como material de construcción, proviene de la desagregación de la roca como producto de procesos de transformación físicos, químicos y mecánicos a la que se ve sometida con el paso del tiempo. Es un material cuyas propiedades dependen directamente del lugar donde se encuentra. Por tanto, conocer sus propiedades es fundamental para determinar su calidad como material de construcción. La tierra, o el suelo de acuerdo con su denominación geológica, es una mezcla de arcilla, limo y arena en la que en ciertas ocasiones contiene grava y piedras en función de su utilización.

Existen diversos criterios para clasificar las técnicas constructivas, en este documento, las técnicas constructivas mediante las cuales se transforma la tierra en un elemento de construcción han sido clasificadas en los siguientes grupos.

1.1.1 Adobe

El adobe se define como un bloque macizo de tierra sin cocer, el cual puede contener paja u otro material que mejore su estabilidad frente a agentes externos y darle mayor cohesión al bloque. Estos bloques se dejan secar al sol proporcionando así resistencia a la mezcla en base a la calidad de la tierra.

Cuando se incorporan otros materiales al adobe (cemento, cal, asfalto...) con el fin de mejorar sus condiciones de resistencia y estabilidad ante la presencia de humedad, se le denomina Adobe Estabilizado.



Figura 2. Bloques de Adobe.

1.1.2 Tapia

También conocido como tapia o tierra pisada, es un método que consiste en elaborar muros con tierra arcillosa húmeda, compactada a golpes con un pisón rellenando un encofrado con diferentes capas.

El encofrado suele ser de madera, aunque también puede ser metálico. En el proceso se van colocando dos planchas de madera paralelas entre las que se vierte tierra en capas de 10 o 15 cm y se compacta a golpes con un pisón de forma manual, aunque en la actualidad se utilizan vibradores que permiten aligerar el proceso.

En ocasiones se añaden a la tierra aditivos como paja o crin de caballo para estabilizarlo, pequeñas piedras para aumentar la resistencia, o palos dispuestos de tal manera que aumente la resistencia manteniendo la elasticidad de la construcción sin añadir peso.



Figura 3. Encofrado y muro de tapia.

1.1.3 BTC

El Bloque de Tierra Comprimida, BTC, son bloques constructivos fabricados a base de una mezcla de tierra, arena y arcilla, pudiendo contener también cal aérea o hidráulica como estabilizante, que es comprimida y moldeada utilizando una prensa mecánica.



Figura 4. Bloque de Tierra Comprimida.

1.1.4 Tierra ensacada

La tierra ensacada o también conocido como Superadobe, es una técnica que se ejecuta superponiendo sacos llenos de tierra, estabilizada o no. Entre hiladas se coloca alambre de espino que añade resistencia a tracción a las estructuras tradicionales, otorgándoles resistencia frente a los terremotos.



Figura 5. Casa construida con tierra ensacada.

1.1.5 COB

El COB es un material de construcción cuyos componentes son arcilla, arena, paja y barro común de tierra. Es muy semejante al adobe y al tapial, teniendo aproximadamente las mismas proporciones de materiales constituyentes. El proceso de fabricación del COB permite que las construcciones realizadas no requieran ser transformadas previamente en ladrillos, sino que, al igual que en el tapial, las paredes son levantadas por tongadas de aproximadamente 30 cm.

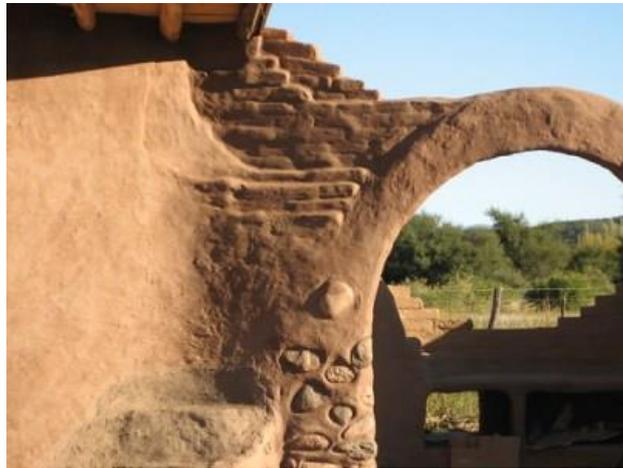


Figura 6. Construcción con COB.

1.2 Antecedentes

En el trabajo Fin de Grado realizado por Isabel Rodríguez Jiménez, en el 2018, titulado “Caracterización del comportamiento a compresión simple sobre probetas de tapia” realizado en la Universidad de Sevilla, más concretamente en el Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructura. Tenía como objetivo principal determinar propiedades características del material tales como: ley de comportamiento, resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad, motivado por un taller que consistía en el diseño y construcción con tapia de una biblioteca en Extremadura. Para poder realizar dicho estudio se decidió fabricar tres tipos distintos de probetas, un grupo formado por veinte probetas prismáticas, otro formado por once probetas cilíndricas y por último ocho probetas prismáticas, pero de una mayor longitud que las primeras destinadas a los ensayos de flexión en tres puntos.

Los resultados muestran una destacada disparidad entre ellos recalcando que ha sido la heterogeneidad del material quien ha provocado este hecho. Las probetas fabricadas mostraron un aspecto de fragilidad a la hora de ser manipuladas. Los comportamientos locales provocados por la heterogeneidad, se acentúan en las probetas cilíndricas, ofreciendo curvas contradictorias incluso dentro de una misma línea vertical. Este hecho está asociado al tamaño de la probeta resaltando la visibilidad de dichas situaciones en las gráficas. Las probetas prismáticas, donde la esbeltez es superior, no ofrecen apenas estos comportamientos presentando curvas similares entre ellas.

Los valores de resistencia a compresión, fueron mayores en las probetas cilíndricas. El motivo de este suceso es el método de fabricación de dichas probetas, ayudados de unos moldes de acero, logrando unas probetas más compactas y con un aspecto exterior más pulido que en las probetas prismáticas. El molde de madera que se confeccionó en un primer momento para dichas probetas ofrecía inconvenientes destacables como la aparición de algunas grietas y el deterioro sucesivo de las paredes interiores por la fricción existente entre la tierra y la madera durante el proceso de compactación.

En otro Trabajo Fin de Grado realizado por José Luis Bocanegra Cerrada, en el 2019, titulado “Puesta a punto de técnica de fabricación de probetas de tapia. Ensayos de tracción indirecta” realizado en la Universidad de Sevilla, más concretamente en el Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructura. También tenía como objetivo principal la caracterización mecánica de las probetas de tapia llevando a cabo el proceso de fabricación y de ensayos. Para este estudio se ensayaron de tres tipos de probetas: 20 probetas prismáticas de 100x100x200 mm, 8 probetas prismáticas de 100x450x100 mm y 11 probetas cilíndricas de 100mm de diámetro y 113 mm de altura.

Durante el proceso de fabricación se observó una diferencia en el acabado superficial de las probetas. En la parte superior presentaban una superficie regular y pulida mientras que dicha superficie se convertía en rugosa y porosa conforme se aproximaba a la base de la probeta.

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.

La media de la resistencia a compresión que se obtuvo en la experimentación de las probetas prismáticas es 1,046 MPa mientras que la media de la resistencia a tracción indirecta es 0,090 MPa, un 8,62 % de la resistencia a compresión. La media de la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas es 1,770 MPa mientras que la media de la resistencia a tracción indirecta es 0,098 MPa, un 5,56% de la resistencia a compresión.

José Daniel Rodríguez Mariscal, en 2021-11-18, realizó una Tesis Doctoral titulada “Análisis experimental del comportamiento mecánico de la tierra como material de construcción”. Esta investigación se desarrolló en la Universidad de Sevilla, más concretamente en el Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Su objetivo principal fue poder proporcionar datos experimentales para el desarrollo de metodologías consistentes para la caracterización mecánica de la tierra como material constructivo. Para ello, decidió realizar dos conjuntos de campañas experimentales. El primero consistía en probetas de adobe y muretes mientras que el segundo se centró en los especímenes de tapia. Para realizar estas campañas se ensayaron un total de 14 ladrillos de adobe: 8 en posición horizontal y 6 en posición vertical, 14 probetas cúbicas: 7 en dirección longitudinal y 7 en dirección transversal, 22 probetas prismáticas y 5 probetas cilíndricas.

Se identificó el comportamiento anisótropo del material ya que afecta a la rigidez y la resistencia a la compresión del material. Se obtuvo una mayor resistencia y rigidez para las probetas cargadas en dirección longitudinal.

Otra conclusión que se obtuvo de este estudio fue que las correlaciones empíricas entre el módulo de Young y la resistencia a compresión no deben considerarse fiables si se basan en mediciones de deformación obtenidas a partir del desplazamiento del actuador de la máquina de ensayos.

Los valores de rigidez obtenidos muestran un gradiente en los resultados que puede atribuirse a una influencia por una diferencia con los niveles de compactación y el grado de daño.

Los resultados también muestran que la mayor coherencia y la menor incertidumbre se encuentran para las velocidades de las ondas sónicas que las de las ondas ultrasónicas. Además, la velocidad de las ondas sónicas es más sensible a los cambios en las propiedades del material debido a los diferentes niveles de compactación o a la presencia de daño.

Las pruebas sónicas se consideran más potentes y robustas que las ultrasónicas. Debido a la alta frecuencia de las ondas ultrasónicas y la consiguiente dispersión de las ondas en presencia de daños. Las velocidades de las ondas ultrasónicas no pueden determinarse para los niveles de daños globales mientras que las velocidades de las ondas sónicas sí.

1.3 Interés

El siglo XXI es reconocido por el avance y expansión de la digitalización y el control de la información a nivel global. Este hecho favorece al desarrollo e innovación en todos los posibles campos de la ciencia y tecnología debido al fácil acceso que existe a la información. En la actualidad, siguen surgiendo nuevas técnicas de construcción revolucionarias pero las cuales requieren el uso en cierta medida de los avances tecnológicos. El elevado costo energético, junto con la contaminación producida en el proceso de fabricación, supone un gran impacto al medio ambiente por parte tanto de las nuevas tecnologías como de las técnicas de construcción ya consolidadas.

Además, el consumismo comienza su desarrollo y crecimiento a lo largo del siglo XX, debido a herramientas como la publicidad que fomentan el consumo. Este hecho está relacionado directamente con los residuos, ya que a un mayor consumo mayor será la cantidad de desperdicios generados. Esto también afecta gravemente al planeta hasta tal punto que se puede llegar a ver mares de plásticos o montañas de desechos.

Con el paso del tiempo, la población cada vez es más consciente del daño que se le está causando al planeta Tierra. Por ello, se propone el estudio de tapia con residuo de vidrio incorporado ya que, de obtener buenas propiedades mecánicas; o incluso similares a las existentes, puede ser una buena alternativa al contribuir a suplir los dos problemas anteriormente mencionados. La tierra como método de construcción es sostenible y no necesita materiales de elevado costo energético. Por otro lado, estudios revelan que las botellas de vidrio son aún más perjudiciales para el medio ambiente que las botellas de plástico. El hecho de poder reutilizar el vidrio triturado para la construcción favorece su reciclaje, reduciendo así las cantidades de desechos de vidrio.

Se puede llegar a considerar que la construcción en tierra supondría un retroceso, pero no es así, ya que hoy en día son muchos países quienes siguen utilizando esta técnica. Existen monumentos y construcciones históricas que prevalecen al paso del tiempo y que se siguen pudiendo contemplar. Esto ayuda a hacerse una idea de las construcciones arquitectónicas que se pueden llegar a conseguir utilizando la tierra como elemento principal. Además, especialmente dichas construcciones históricas requieren un mantenimiento para evitar su deterioro. Estudios como este, que pretenden desarrollar el conocimiento del comportamiento de las construcciones de tierra pueden ser llegar a ser útiles para dicha finalidad en un futuro.

1.4 Objetivos del proyecto

El desarrollo de las civilizaciones implica de manera implícita un desarrollo en los métodos de construcción, lo que lleva a la utilización de nuevos avances y nuevas técnicas. A pesar de esto, su historia permanece en el territorio a través de los monumentos históricos, religiosos, fortalezas... que se fueron construyendo durante el paso del tiempo. En este aspecto, especialmente el sur de España posee una gran riqueza debido a las diversas construcciones realizadas con tierra, las cuales requieren mantenimiento debido a su deterioro. Además, como se ha mencionado anteriormente, hoy en día, en diversos países alrededor del mundo, se sigue utilizando la tierra como principal método de construcción. Estos factores junto con otros citados anteriormente, ha llevado a la Universidad de Sevilla y más concretamente el departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras a continuar con la línea de investigación de la mejora del conocimiento del comportamiento mecánico de la tierra como material de construcción.

En cuanto al proceso de fabricación, se contó con la ayuda del departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la ETSI de Ingeniería de la Edificación quienes a través de estudios previos y un análisis granulométrico, permitió conocer tanto los componentes, como los porcentajes que formarían el suelo objeto de estudio.

Los ensayos necesarios para poder caracterizar el comportamiento mecánico de la tierra se han llevado a cabo en el laboratorio del departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, el cual se encuentra en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería. En estos ensayos se han utilizado nuevas técnicas que anteriormente no se habían utilizado en este departamento, lo cual sirve como aprendizaje y profundización para futuras investigaciones que puedan llevarse a cabo. En el apartado de *Descripción de los ensayos*, se profundizará en dichas técnicas y se explicarán más detalladamente.

Otro aprendizaje que se obtuvo de esta investigación, son las mejoras y cambios a realizar en el proceso para futuros proyectos debido a situaciones que no se contemplaban en la planificación y que fueron surgiendo conforme avanzaban los ensayos. Algunas de estas situaciones se dan por factores ajenos a la investigación, pero las cuales influyen directamente en ella.

2 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

La tierra como material de construcción ha sido utilizada desde la prehistoria hasta nuestros días. Así mismo, la vivienda es la estructura que más destaca en la historia de la humanidad una vez que surgen los primeros pueblos sedentarios. Debido a su bajo costo y fácil producción, sin materiales de alta energía incorporados, hacía de la tierra un material idóneo para la construcción de los hogares. En realidad, la importancia de este material en la historia ha sido tal que, a pesar de los avances tecnológicos del último siglo y las nuevas técnicas de construcción existentes, en 2017, el 33% de las casas de todo el mundo estaban construidas con tierra [15]. La construcción de edificios es un sector muy contaminante siendo responsable del más del 40% del consumo mundial de energía, donde se incluye: construcción de materiales altamente procesados, fabricación, transporte, construcción, fase de operación y demolición del edificio. Por consiguiente, esto agota gravemente los recursos naturales por lo que existe un elevado interés en el desarrollo de materiales de construcción sostenibles con bajo impacto ambiental, entre los que destaca la tierra [16].

Existen numerosas construcciones históricas repartidas alrededor del mundo, de diferentes culturas y civilizaciones, que han prevalecido al pasado el tiempo y hoy en día, se pueden seguir contemplando. En el 2012, las construcciones con tierra representaban el 10% de la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO [20]. En parte, es por ello que es necesario continuar investigando el comportamiento y técnicas de conservación de las construcciones en tierra para poder preservar dicho patrimonio.

En 2009, se presentó un estudio sobre la durabilidad que presentaba la tapia estabilizada y no estabilizada al paso del tiempo. El resultado mostró mediante estereofotogrametría que la profundidad media de erosión en el caso de la tapia estabilizada con un 5% de cal hidráulica era del 0.5% del espesor de dicha tapia. Mientras que en el caso de la tapia no estabilizada su erosión llegaba a alcanzar el 1.6% del espesor [19].

En una investigación donde se analizaron las propiedades físico-mecánicas de la tapia estabilizada con cal mediante ensayos de ultrasonidos, se determinó la importancia del contenido de humedad y su influencia en la resistencia mecánica. Siendo la densidad seca, la porosidad abierta y la resistencia a compresión los parámetros en los que influye decisivamente. No obstante, la porosidad abierta y la densidad seca son parámetros opuestos, relacionados con el rendimiento mecánico, de tal manera que, en el análisis estadístico, para las probetas ensayadas con un contenido de humedad inferior al óptimo, los niveles de resistencia compresión y densidad seca eran bajos mientras que los niveles de porosidad libre eran elevados. En cambio, las probetas con un contenido de humedad superior al óptimo se caracterizaban por niveles altos de densidad seca y resistencia a compresión y niveles bajos de porosidad abierta [19].

Durante el paso de los siglos el modelo de gestión de residuos siempre ha tenido un carácter lineal. Es en las últimas décadas, donde la conciencia sobre el medio ambiente se ha instalado en la sociedad y ha promovido que este modelo de gestión se vea afectado con el objetivo de poder conseguir una economía circular. Por consiguiente, el aumento del precio y la disminución de las reservas de arena para la construcción fomenta la necesidad de buscar y desarrollar nuevas alternativas sostenibles y rentables como material de construcción, ayudando así a que se produzca esta transición [17]. A pesar de los avances tecnológicos y las nuevas técnicas de construcción, la tierra se sigue considerando uno de los métodos más populares a la hora de afrontar los impactos ambientales y los aspectos económicos [17]. Por lo tanto, el uso del vidrio triturado como alternativa a la arena tradicional o áridos naturales, supondría de manera indirecta un doble beneficio ayudando a combatir el agotamiento natural de la arena y la reducción del vidrio de desecho que cada vez es mayor [17].

Un estudio realizado acerca del uso potencial de residuos de vidrio triturado como una alternativa sostenible a la arena natural y manufacturada, observó a través de pruebas de caracterización geotécnica que el vidrio triturado

tiene un comportamiento similar a la arena natural y manufacturada, e incluso obteniendo una mayor permeabilidad y resistencia a la abrasión [17].

Una revisión llevada a cabo por *Shantanu Pablo, Mohammad Shariful Islan y Tausif E. Elahi* de 96 estudios existentes sobre la eficacia del refuerzo con diferentes fibras naturales y sintéticas, demostró que no existe una fibra específica que demuestre un mejor desempeño considerando todas las propiedades, si no que cada fibra en función de sus propiedades demostró ser mejor para diferentes funciones. Así mismo, este conocimiento facilita la labor del ingeniero quien será el responsable de determinar que fibra es la adecuada para su objetivo [18].

A través de la prueba de compactación Proctor estándar o compactación Proctor modificada se determinó que la incorporación de fibra al suelo provoca una disminución en la densidad aparente. Esto se debe a que las fibras poseen una densidad menor, además de la respuesta elástica que presentan dichas fibras al proceso de compactación. Del mismo modo, la reducción de la densidad favorece el desarrollo de materiales más ligeros y una posible mayor resistencia a terremotos, pero una reducción excesiva podría suponer defectos estructurales [18].

El uso de un contenido de fibra óptimo implica una mayor resistencia a compresión por parte del suelo, debido a que la fibra forma una matriz isotrópica y capa de interfaz entre el suelo y la fibra. Por consiguiente, esto permite que las partículas del suelo no se muevan libremente y mejora la adhesión entre ellas, haciendo así que la mezcla sea más homogénea y con menor cantidad de poros. Únicamente la fibra de heno provocó una disminución de la resistencia a compresión, debido a que crea planos débiles en la matriz promoviendo así que se produzca el fallo. Por otro lado, algunas fibras, como es la fibra de vidrio muestran un *balling effect*; adquiriendo forma de una especie de bola lo que afecta a su distribución en la matriz, dificultando el desarrollo de la resistencia. Estas fibras presentan una menor ganancia de resistencia incluso con relaciones de aspecto más altas [18].

La capacidad de absorción de agua es muy significativa ya que afecta tanto a la resistencia como a la durabilidad. Las fibras naturales son menos efectivas en cuanto a su reducción debido a la presencia de celulosa y la naturaleza porosa de las mismas. En cambio, las fibras sintéticas son más efectivas debido a su estructura compacta y no porosa [18].

La resistencia a erosión se determinó realizando una prueba de aspersión, simulando así el proceso que tendría lugar durante el paso del tiempo por la lluvia. El refuerzo de fibra mejoró significativamente la resistencia a erosión debido a la mejor adhesión de las fibras a la matriz del suelo, lo que dificulta su movimiento. Así mismo, el suelo reforzado con fibras de vidrio ha presentado una menor resistencia que el resto de las fibras debido al *balling effect* [18].

3 PROPIEDADES DEL SUELO

La selección de los materiales adecuados para el proceso de fabricación es un factor muy importante ya que condiciona a las propiedades de las probetas. Para esta selección se ha contado con la ayuda del departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la ETSI de Ingeniería de la Edificación, para la realización de un estudio granulométrico.

Los principales materiales que componen la mezcla son arena, arcilla, cal y agua. En cuanto a la arena, se utilizan dos tipos diferentes, por un lado, se encuentra la arena fina y por otro la arena gruesa, siendo necesaria esta distinción para obtener el compuesto final deseado. En cuanto a la cal, su función principal consiste en estabilizar la mezcla. A la hora de realizar la mezcla con vidrio, el porcentaje de arena utilizado se verá reducido, siendo esta sustituida por vidrio, en cambio la cal, arcilla y agua se mantendrá un 5%, 15% y 8% del peso total de la mezcla respectivamente.

A continuación, se muestra una tabla donde se recoge la granulometría del conjunto con sus respectivos porcentajes.

Tabla 1. Granulometría de las probetas

Material	Sin vidrio [%]	Con Vidrio [%]
Arena fina	50	12.5
Arena gruesa	20	5
Vidrio	-	52.5
Arcilla roja	15	15
Cal	5	5
Agua	8	8

Tabla 2. Proporción de tipos de vidrio (en peso)

Vidrio grueso [%]	35	Vidrio medio [%]	65
-------------------	----	------------------	----

En el caso de la tapia con vidrio, este componente representa el 52.5% del peso total lo cual implica una reducción considerable de la arena tanto fina como gruesa. Para intentar mantener las mismas características que posee la tapia; es decir, se pretende introducir vidrio con una granulometría similar a la de la arena sustituida, es por ello que también es necesario hacer una distinción dentro del vidrio. Dentro de este porcentaje de 52.5% el 35% está compuesto por vidrio grueso mientras que el 65% restante es vidrio medio triturado.

Para conocer la granulometría con más precisión se realizó un proceso de tamizado por vía seca a través del cual gracias a tamices de diferentes tamaños se consigue conocer el porcentaje de material que pasa a través de ellos para así poder construir sus respectivas curvas y ser comparadas con las de Fuller.

A continuación, se muestra una tabla donde se recogen los porcentajes de vidrio grueso, medio triturado, la mezcla de ambos y Fuller para los diferentes tamices utilizados.

Tabla 3. Tamices utilizados con el correspondiente porcentaje de vidrio

Tamiz [mm]	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
Grueso [%]	50.57	3.90	-	-	-	-	-
Medio triturado [%]	100	96.08	64.28	42.75	26.73	10.45	2.90
Mezcla [%]	82.70	63.81	41.78	27.79	17.37	6.79	1.89
Fuller	70.70	50	35.40	25	17.70	12.5	8.80

En la tabla anterior, únicamente muestra los tamices a partir de los cuales comienza a no pasar material. También se utilizaron tamices superiores comenzando desde 125 mm, 63 mm, 31.5 mm, 16 mm y 8 mm en los cuales el porcentaje del material que pasa era del 100%.

Para poder comparar la curva de Fuller con el resto de los componentes, se ha representado en una misma gráfica las curvas que representan el porcentaje de material que pasa con respecto a los tamices. El tamaño máximo de árido considerado para elaborar la parábola de Fuller es de 8 mm. Para facilitar su análisis se ha aplicado una escala logarítmica al eje horizontal ya que a partir del tamiz de 8 mm en adelante pasa el 100% del material.

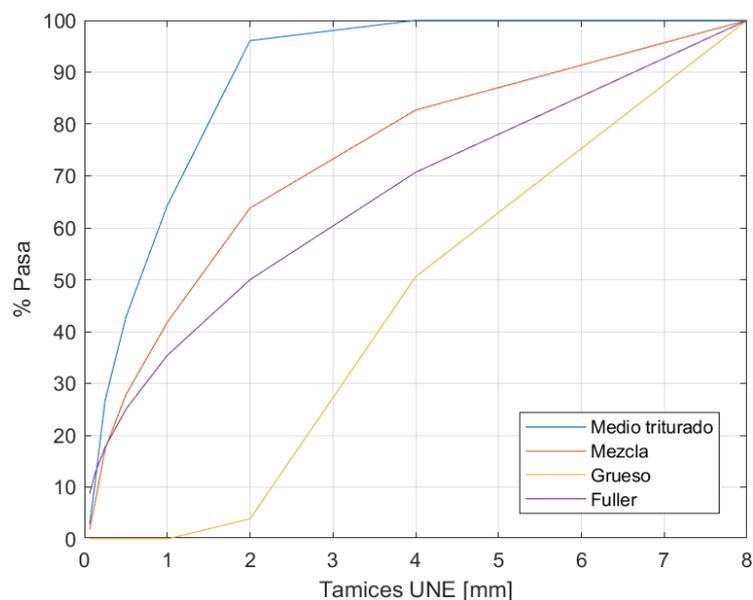


Figura 7. Granulometría 35% Vidrio grueso triturado y 65% Vidrio medio triturado

Como se puede observar en la gráfica anterior, la curva del grueso se encuentra por debajo de la de Fuller lo que indica que pasa menos árido del que debe pasar. En cambio, para la mezcla y el medio triturado la curva se encuentra por encima.

4 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN

Para la fabricación de las probetas se llevó a cabo un proceso definido y ordenado con la finalidad de realizar dos tipos de probetas diferentes, las cuales se utilizarían para la realización tanto del ensayo de ultrasonidos como el ensayo de compresión. Se decidió fabricar 58 probetas de las cuales 28 cuentan con vidrio y las 30 restantes sin él.

Tabla 4. Número de probetas ensayadas

Número de probetas	Con vidrio	Sin vidrio
58	28	30

La planificación inicial de curado consistía en realizar los mismos ensayos mensualmente hasta hacer un tiempo de curado final de 120 días. Debido a circunstancias ajenas a esta investigación estos periodos de tiempo se han visto ligeramente modificados. Por tanto, de manera exacta los ensayos se realizaron en los días 35,75,105 y 135 desde la finalización del proceso de fabricación de las probetas. Por comodidad, para poder facilitar tanto la identificación como el tratado de los datos, a la hora de asociar la edad a cada probeta se hará referencia a la edad teórica. En aquellas circunstancias donde la fecha tenga un especial interés se matizará cuantos días de diferencia reales existen entre sí.

Tabla 5. Días de referencia para realizar los ensayos junto con los días reales.

Días referencia	Días reales
30	35
60	75
90	105
120	135

4.1. Tipología de probeta

Durante esta campaña de experimentación, todas las probetas que se van a fabricar y ensayar tienen la misma geometría siendo todas ellas probetas prismáticas. Para poder realizar correctamente el estudio de tapia con residuo incorporado y estabilizado con cal ha sido necesario diferenciar las probetas en dos tipos. Aquellas probetas que incorporarán vidrio entre sus componentes y el resto de las probetas las cuales se utilizarán como referencia para realizar las comparativas pertinentes.

Ambos tipos de probetas prismáticas son de base cuadrangular con unas dimensiones de 300x100x100 mm. Para obtener dicha geometría se ha utilizado un molde de metacrilato que se describirá con más detalle en los siguientes apartados.

Para esta campaña se cuenta con un total de 58 probetas de las cuales 28 son con vidrio y las 30 restantes sin vidrio. Esta diferencia de dos probetas se debe a la cantidad inicial de material que se utilizó para el proceso de fabricación.

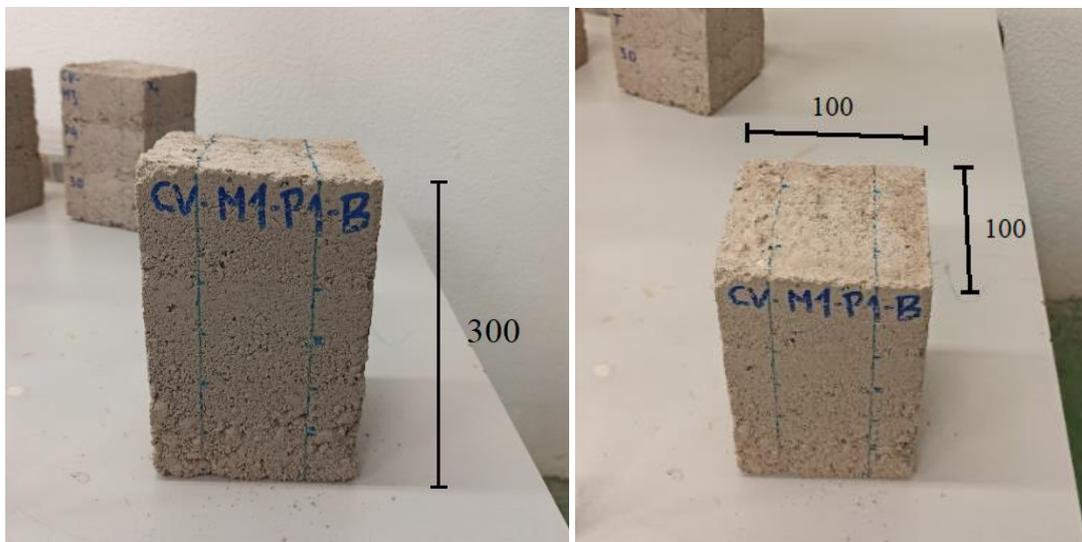


Figura 8. Dimensiones de las probetas.

4.2. Nomenclatura

Tanto en el proceso de fabricación como durante la realización de los ensayos, se ha utilizado un mismo código de identificación para las probetas. Se ha seleccionado una nomenclatura específica de tal manera que en todo momento se identifique el tipo de mezcla utilizada, posición en el molde durante el periodo de fabricación y edad de curado.

A continuación, se muestra una imagen donde se representa el código de identificación de las probetas.

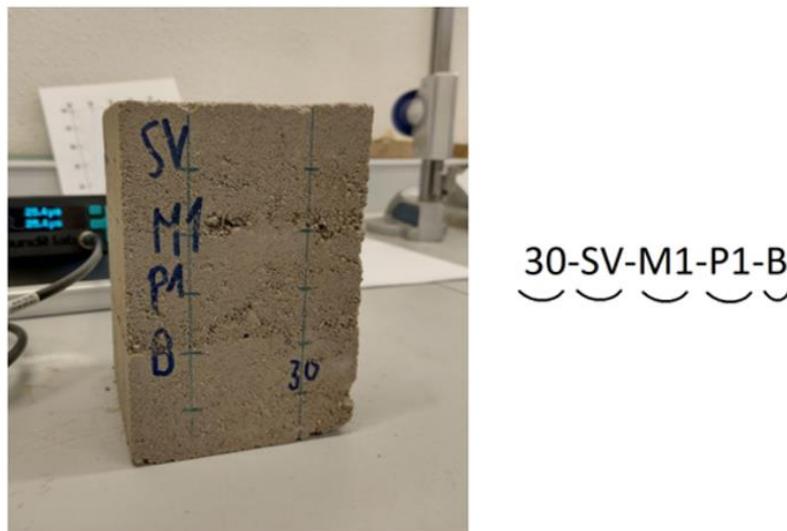


Figura 9. Código de identificación.

1. El **primer** término representa la edad de curado que posee la probeta, en este caso dicha probeta tiene una edad de curado de 30 días.
2. El **segundo** término indica el tipo de mezcla utilizada; es decir si contiene vidrio o no.
3. El **tercer** término representa el molde utilizado durante el proceso de fabricación, en este caso este proceso se llevó a cabo en el primer molde.
4. El **cuarto** término indica la posición en el interior del molde que se le ha sido asignada a esta probeta. Más adelante, en la *figura 11* se observan las cuatro posibles posiciones a las que se puede hacer referencia.
5. El **quinto** término corresponde con la posición que ocupa la probeta con respecto a la otra probeta de la misma columna, haciendo así una diferencia entre las que se encuentran en la parte superior y en la inferior. En este caso la B corresponde a la parte inferior siendo la palabra de referencia *Bottom*. La otra posible opción es T que corresponde a la parte superior siendo la palabra de referencia *Top*.

4.3. Descripción del molde

Para el proceso de fabricación se ha hecho uso de dos moldes idénticos facilitados por el departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Sevilla.

Dicho molde está compuesto por un conjunto de tablas fabricadas en metacrilato con el objetivo de crear un encofrado con las dimensiones específicas de las probetas. El ensamblado de este molde permite fabricar 4 lotes de probetas simultáneamente haciendo un total de 8 probetas por molde. Está formado por una base y una región cuadrangular que a su vez se encuentra dividida por dos tablas separadoras dispuestas de forma perpendicular. A continuación, se adjunta una imagen del molde utilizado.



Figura 10. Molde utilizado en el proceso de fabricación

Para poder distinguir las probetas en procesos posteriores como se ha mencionado en el apartado anterior se ha utilizado una nomenclatura específica. En este paso inicial se adjudica tanto la posición de *top* o *bottom*, como la colocación en el interior del molde. Este dato es importante ya que en los ensayos todas las probetas se han de ensayar con la misma orientación y en las mismas condiciones. En la imagen que se muestra a continuación, se representa según los números indicados en el molde que caras se consideran positivas y negativas.

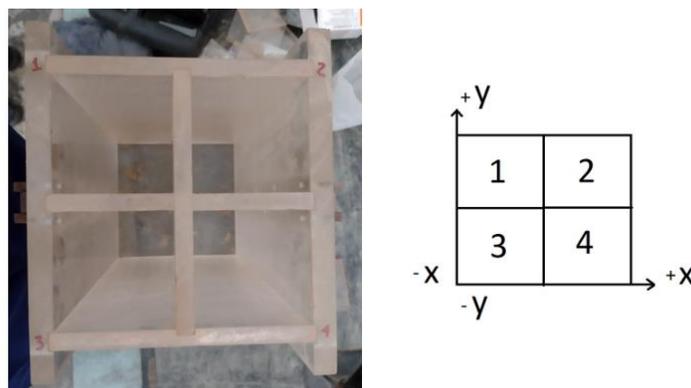


Figura 11. Disposición de las probetas dentro del molde.

4.4. Mezclado de componentes

El mezclado de componentes es un proceso importante ya que debe garantizar que el suelo posea las propiedades y características previamente descritas. Este proceso se divide en dos partes, una mezcla inicial donde se añaden todos los materiales salvo la cal y el agua, y una mezcla final donde se añadirán estos dos ingredientes la cual tiene lugar justo antes del proceso de fabricación. Esta diferenciación se realiza para así tener un mayor control de la humedad de la mezcla y evitar que el estabilizante, que en este caso es la cal, comience a reaccionar antes de lo deseado. Para realizar esta operación de mezclado de componentes se ha hecho uso de una hormigonera de tamaño medio.

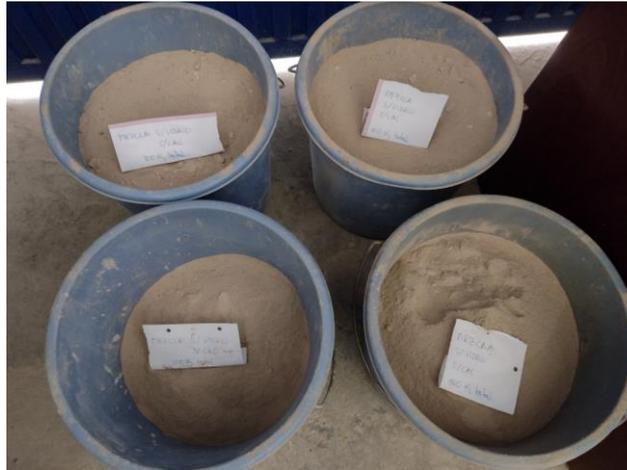


Figura 12. Mezcla de componentes en seco sin vidrio.

La mezcla en seco se pudo realizar para la totalidad de la cantidad de los materiales en una sola amasada. En cambio, al hacer la mezcla en húmedo del total de los componentes; donde se incluye la cal y el agua, de las probetas con vidrio, se observó que el mezclado podría no realizarse de manera uniforme, sin grumos. Por este motivo, para el mezclado del material sin vidrio; que se realizó posteriormente, se optó por hacer el mezclado en dos amasadas. El grado de homogenización en el proceso de mezclado ha podido ocasionar alguna variación a nivel visual en el acabado de las superficies externas. Descartando un posible impacto en las propiedades mecánicas de las probetas.



Figura 13. Proceso de mezcla de componentes.

Durante el proceso de mezclado se tomaron diversas muestras de humedad para conocer el estado inicial en el que se encontraban los materiales. Antes de dar comienzo a la mezcla final; en la que se añade agua, se realizó una prueba de humedad para conocer su estado, obteniendo un valor alrededor del 1%. Es importante conocer este dato ya que influye significativamente en la cantidad de agua que era necesario añadir, teniendo en cuenta que el objetivo final era conseguir una humedad del 8%.

4.5. Humedad de fabricación

Un valor determinante en la resistencia que posee el suelo es la humedad con la que cuenta dicha mezcla. La resistencia de la probeta fluctúa en función de la relación existente entre la densidad seca y la humedad. Para determinar la humedad óptima, en este caso se ha optado por realizar un ensayo de compactación denominado *Proctor Normal* siguiendo la norma UNE 103-500-94 [12]. Este método consiste en la determinación de las densidades secas de varias probetas siendo compactadas con la misma energía de $0,583 \text{ J/cm}^3$ pero con condiciones de humedad diferentes. Para cada contenido de humedad se alcanzan diferentes densidades, de manera que estos pares de valores definen la relación buscada. Para la granulometría seleccionada se determinó que la humedad óptima; es decir aquella con la que se consigue la máxima densidad para una misma energía, era de un 8%.



Figura 14. Ensayo Proctor normal

Como se ha mencionado anteriormente, la humedad durante todo el proceso es un factor muy importante y es por ello que es necesario mantener un control antes de la fabricación, durante los ensayos y tras finalizar las pruebas pertinentes.

Para conocer la humedad, se realiza un procedimiento mediante secado en horno según la norma UNE 103-300-93: *Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa* [13]. Este procedimiento consiste en extraer una muestra de suelo y colocarla en una bandeja conociendo previamente tanto el peso de la bandeja como el de suelo. Esta muestra se mantendrá en el interior de la estufa durante 24 horas a una temperatura de aproximadamente 110° . Tras pasar dicho periodo de tiempo, al conocer el peso que posee la muestra seca, se puede calcular la humedad que tenía antes de dar comienzo el proceso de secado.



Figura 15. Estufa para el secado de probetas.

En caso de que fuera necesario conocer la humedad del suelo en un lapso inferior a 24 horas; con el objetivo de conocer la humedad en un instante concreto, se realizaba un procedimiento similar al anteriormente mencionado, pero en esta ocasión con ayuda de un hornillo y una sartén. La tierra se depositaba en la sartén y se mantenía en el hornillo durante aproximadamente 15 minutos. Al igual que en el proceso de secado, una vez conocido el peso antes y después del secado se puede obtener el porcentaje de humedad.



Figura 16. Proceso de secado mediante sartén.

Durante la mezcla en seco se extrajeron 5 muestras en diferentes momentos para así obtener una buena fiabilidad. El porcentaje de humedad medio que se obtuvo fue de 1.18%, valor que se esperaba obtener. Durante la mezcla de fabricación con vidrio también se analizaron 5 muestras las cuales dieron una humedad media de 8%, el cual era el valor objetivo. En cambio, en la mezcla de fabricación sin vidrio la media de las 5 muestras que analizaron dio una media 7.65%, ligeramente menor pero bastante aproximada a lo deseado.

4.6. Procedimiento de compactación

Este proceso consiste en la creación de las probetas. Una vez se dispone de la mezcla lo más homogénea posible, se procede al proceso de compactación. Para este proceso es necesario el uso de un martillo neumático el cual gracias a un accesorio cuadrangular que se sitúa en su extremo favorece la compactación por tongadas debido a la forma prismática que poseen las probetas.

Se considera un proceso manual ya que es la persona encargada del martillo quien debe ir recorriendo toda la superficie del molde para que produzca la compactación de manera adecuada. Para que este proceso se realice lo más idéntico posible en todos los casos, se definió tanto el recorrido que debía hacer el martillo como la energía de compactación que se debía aplicar. En cuanto a la energía, sería la misma persona quien tendría el control del martillo; con el objetivo de aplicar la misma fuerza, durante un tiempo definido de 10 segundos los cuales se tomarían con un cronómetro. La compactación se realizó tongada a tongada de manera consecutiva entre las probetas con el objetivo de que los moldes, en todo momento tuvieran una cantidad similar de material en su interior.



Figura 17. Proceso de compactación.

Como se ha mencionado previamente, se realizó el proceso por tongadas. Cada tongada disponía de una masa de 1 kg haciendo un total de tres tongadas por probeta, para así conseguir los 300 cm de altura previamente definidos. El molde poseía una altura aproximada de 1100 cm, por lo que el material sobrante del último tramo se utilizaría para el estudio de porosidad y humedad.



Figura 18. Molde sin pared lateral.

Para poder separar las probetas en el interior del molde se hizo uso de separadores de nylon, estos no aportan rigidez por lo que no se consiguió una superficie idónea entre probetas.

En el momento que se comprobó la influencia de esta situación tras los ensayos de compresión de las probetas con una edad de 30 días, se propuso realizar un refrentado al resto de probetas, con el objetivo de conseguir una mayor perpendicularidad entre todas sus caras.

Para el refrentado se aplicó un aceite especial para evitar que el yeso se adhiriese a la mesa donde tuvo lugar el proceso. Una vez se disponía de la zona correctamente preparada, se realizaba la mezcla de agua con yeso YG/L; yeso grueso de aplicación manual de fraguado lento, hasta conseguir una consistencia adecuada para refrentar la cara superior e inferior de la probeta. Para conseguir la perpendicularidad de las caras se hizo uso tanto de un nivelador como de una escuadra ya que el paralelismo entre las caras superiores no garantizaba la perpendicularidad de sus laterales.



Figura 19. Proceso de refrentado

4.7. Densidad y porosidad

Como se ha mencionado en el apartado anterior, *procedimiento de compactación*, en la parte superior del molde se fabricó una tongada extra (véase la figura 18) la cual serviría para el estudio de densidad y porosidad y así conseguir información adicional sobre las características físicas de las probetas. Este análisis se ha realizado en el laboratorio de Construcciones Arquitectónicas II de la ETSI de Ingeniería de la Edificación. A continuación, se muestra una tabla donde se recogen todos los datos.

Tabla 6. Datos del estudio de densidad y porosidad

Muestra	Peso seco [gr]	Peso sumergido [gr]	Peso Saturado [gr]	D real [gr/cm ³]	D aparente [gr/cm ³]	Porosidad [%]
CV M1 P1	397,01	241,55	456,28	2,55	1,85	28
CV M1 P2	388,60	236,64	444,65	2,56	1,87	27
CV M2 P1	456,42	278,50	512,31	2,57	1,95	24
CV M2 P2	462,35	282,03	522,08	2,56	1,93	25
CV M3 P1	422,35	256,15	478,38	2,54	1,90	25
CV M3 P2	397,75	241,61	467,86	2,55	1,76	31
CV M4 P1	394,51	240,05	450,41	2,55	1,88	27
CV M4 P2	409,25	248,05	471,47	2,54	1,83	28
SV M1 P1	418,61	261,57	479,06	2,67	1,92	28
SV M1 P2	375,37	234,63	447,83	2,67	1,76	34
SV M2 P1	420,95	262,78	474,53	2,66	1,99	25
SV M2 P2	415,10	259,68	476,91	2,67	1,91	28
SV M3 P1	457,66	285,40	522,81	2,66	1,93	27
SV M3 P2	429,57	268,80	491,67	2,67	1,93	28
SV M4 P1	431,10	269,95	504,37	2,68	1,84	31
SV M4 P2	344,01	214,30	403,77	2,65	1,82	32

En la mitad superior de la tabla se muestran los valores en la fabricación con vidrio donde la densidad aparente media es de 1.87 gr/cm³ con una desviación típica de 0.06 y una media de porosidad de 26.74% con una desviación

típica de 2.949. Mientras que en la parte inferior los correspondientes a sin vidrio, la densidad aparente media es de 1.89 gr/cm^3 con una desviación típica de 0.074 y una media de porosidad de 29% con una desviación típica de 2.231.

Para el caso de la densidad aparente, los valores de las desviaciones típicas son bastante superiores a la diferencia entre los valores promedio, lo que indica que no se pueda afirmar que existan diferencias de densidad apreciables.

Sin embargo, en el caso de la porosidad, los valores de la desviación típica son del orden de la diferencia entre los valores promedio de las probetas con vidrio y sin vidrio, con lo que puede concluirse que las probetas sin vidrio tienen una porosidad algo superior. Es importante matizar que de la apariencia externa de las probetas sugiere precisamente lo contrario, mostrando una mayor porosidad las probetas con vidrio, tal y como se ha comentado en el apartado *4.4 Mezclado de componentes*

5 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Para el estudio de tapia con residuo de vidrio incorporado y estabilizado con cal, se ha decidido realizar dos ensayos diferentes, uno de carácter destructivo y otro no destructivo. El primero consiste en una inspección del suelo mediante ultrasonidos, lo cual nos facilitará las velocidades de propagación de onda elástica que posee el material. Por otro lado, el ensayo a compresión de carácter destructivo, se centra en caracterizar la resistencia de las probetas al ser sometidas a compresión.

5.1. Ensayos de ultrasonidos

5.1.1 Marco teórico

El ensayo de ultrasonidos es un ensayo no destructivo que consiste en medir la velocidad de propagación de una onda elástica en un espécimen para así poder calcular y conocer algunas de sus propiedades mecánicas. Para ello, es necesario realizar diferentes mediciones en distintos puntos de la probeta. Estas mediciones se llevan a cabo con un emisor y receptor. El emisor es un piezoeléctrico el cual genera una pulso mecánico al ser sometido a una carga eléctrica. Esta carga eléctrica es proporcional al esfuerzo mecánico aplicado.

Existen diferentes tipos de ensayos de ultrasonidos en función de las ondas que se desea medir. Los ensayos más comunes son el ensayo directo y el indirecto. El ensayo directo consiste en situar el emisor y el receptor en las caras enfrentadas, tal y como se muestra más adelante en la figura 22.

Es necesario diferenciar los diferentes tipo de ondas que existen para que a la hora de realizar el ensayo se puedan analizar y estudiar las ondas deseadas. Las ondas que se propagan por el interior pueden ser tanto ondas P como ondas S, las cuales también son conocidas como ondas de corte. En cambio, las ondas superficiales pueden ser ondas volumétricas, conocidas como ondas tipo P, ondas de corte (ondas S) o de Rayleigh, las cuales únicamente se propagan por la superficie libre.

En este caso de la manera que se ha planteado el ensayo de ultrasonidos, las ondas con las se va a trabajar con las ondas volumétricas (ondas P) ya que al ser las ondas que se propagan con mayor rapidez, son las primeras perturbaciones que se detectan.

A partir de varios ensayos directos sobre un mismo plano se puede representar una imagen tomográfica del campo de velocidades. Este tipo de ensayo consiste en realizar un barrido de mediciones en la cara opuesta por cada punto de emisión, de manera que se obtiene un mapa de velocidades entre cada par de puntos de medida ubicados en caras enfrentadas. Durante la experimentación se hicieron diversos ensayos tomográficos los cuales no están dentro del alcance de este trabajo. En este proyecto únicamente se estudiará los ensayos directos.

Es importante tener en cuenta a la hora de seleccionar la frecuencia, la relación que tiene con la distancia y resolución, ya que, a menor frecuencia, la onda puede recorrer mayores distancias que con una resolución menor. Por consiguiente, a mayor frecuencia la distancia recorrida es menor pero su resolución es mayor.

Como se ha mencionado al principio de este apartado este ensayo tiene como objetivo medir la velocidad de propagación. Realmente a la hora de realizar el ensayo, no se mide directamente la velocidad si no que se mide el tiempo que tarda la onda en recorrer una distancia determinada. Una vez conocido el tiempo junto con la distancia recorrida se realiza el cálculo de la velocidad. Por eso es importante que cada medición realizada tenga correctamente definido el parámetro de la distancia.

Este ensayo proporciona una velocidad aparente que no es la real ya que existe la posibilidad de que haya perturbaciones en el camino recorrido por la onda, tales como huecos, grietas, defectos...

5.1.2 Descripción del equipo de medida

El equipo de medida que se va a utilizar para los ensayos de ultrasonidos es el *Pundit Lab (+)*, el cual está diseñado específicamente para su uso en las operaciones de laboratorio. Para este ensayo en concreto se utilizaron transductores de 54 kHz ya que se consideraron los más adecuados en base a la probeta que se iba a ensayar. Para llevar a cabo las mediciones se emplearon palpadores de superficie plana sin el uso de gel de acoplamiento. Este equipo, permite un control total de todas las funciones desde el ordenador facilitando así su uso.



Figura 20. Equipo de medida Pundit Lab.

5.1.3 Procedimiento de ensayo

El objetivo principal del ensayo no destructivo de ultrasonidos, consiste en obtener las velocidades de propagación de onda por toda la probeta. Para poder obtener todas las mediciones realizando únicamente el ensayo directo, es necesario diferenciar la probeta en dos planos ortogonales de forma longitudinal que conforma la estructura prismática. Esta diferenciación nos permite dividir cada plano en 6 puntos de medidas diferentes para las caras perpendiculares a la base, y 5 puntos de medida en la cara superior e inferior. Esta diferenciación permite abarcar la superficie completa de la probeta.

A continuación, en la figura 21 se muestra la división de planos ortogonales que se ha realizado para el ensayo de ultrasonidos.

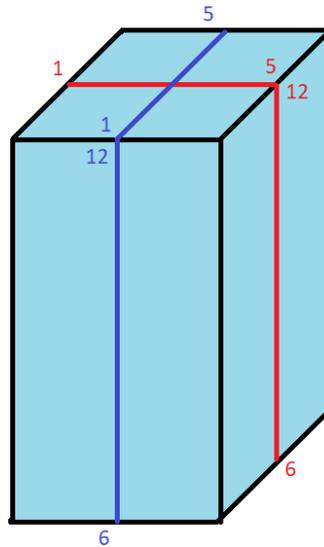


Figura 21. Planos ortogonales de medición que conforman la probeta.

Como se ha comentado anteriormente en el apartado de *marco teórico*, existen dos tipos diferentes de mediciones directas. Una es considerada como ensayo directo simple y otra como representación tomográfica. Las mediciones directas implican que tanto el emisor como el receptor se encuentran a la misma altura en el plano de medida, manteniendo así una distancia constante.

Para poder entender bien este concepto, en la siguiente imagen se muestra cómo se llevó a cabo el ensayo directo.

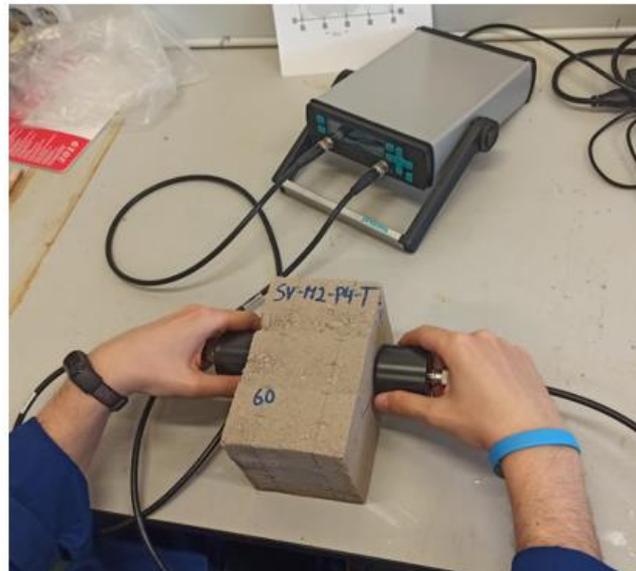


Figura 22. Demostración de la colocación del emisor y receptor en el ensayo directo.

Por otro lado, para el ensayo tomográfico, esta distancia no permanece constante si no que varía en función de donde se encuentre situado el emisor y receptor ya que consiste en medir para cada punto de transmisión todos los puntos de recepción. Este método permite obtener un mapa de velocidades más preciso que el ensayo directo ya que a mayor número de diferentes medidas más exacto y preciso será dicho mapa. Durante esta campaña de experimentación, se han realizado ambos tipos de mediciones, pero únicamente el ensayo directo simple es objeto de estudio en este documento.

A continuación, en la siguiente imagen, se muestra de manera esquemática las mediciones que se tendrían que llevar a cabo en el ensayo tomográfico.

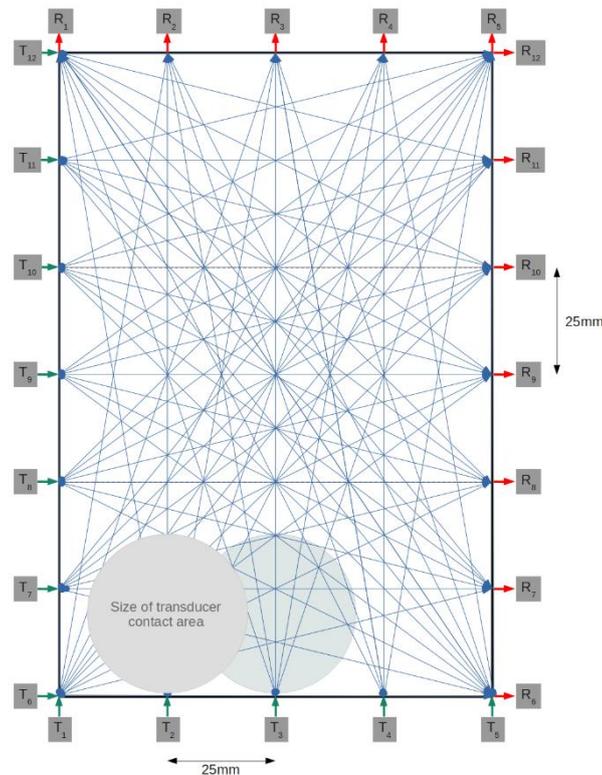


Figura 23. Esquema de puntos de medida ensayo tomográfico.

Para poder identificar los diferentes puntos de medida en los planos que dividen la probeta, se utilizó un rotulador permanente junto con una plantilla para que el patrón a dibujar fuera idéntico en todas las probetas. Estas marcas que se realizaron para identificar los puntos de medida se pueden apreciar claramente en la imagen que se muestra en la figura 9 del apartado 4.2 Nomenclatura.

El siguiente paso a seguir durante el ensayo de ultrasonidos, consiste en calibrar el sistema de medida. Para ello, se ha utilizado un patrón con el objetivo de verificar que la velocidad de onda registrada por el dispositivo coincida con la especificada en dicho patrón. Una vez que esta medida es correcta, se procede a configurar el software con las especificaciones necesarias para que tanto las mediciones como los resultados sean los deseados.

Para este caso en concreto se ha utilizado un pulso cuya amplitud se ha definido en 500V con una ganancia del receptor de 1000x y un time frame de 0,3 ms, para así poder abarcar todas las mediciones y poder conseguir el mapa de velocidades completo.

Una vez el sistema se encuentra correctamente calibrado se procede a la medición tal y como se ha explicado anteriormente. En función de si se mide la probeta de manera longitudinal u horizontal, se realizarán cinco mediciones de 7 o 5 eventos respectivamente con tiempo de intervalo de 8 segundos entre sí. Una vez se ha concluido el ensayo, se anota la identificación de las mediciones en una hoja de registro de mediciones para así poder tener todas correctamente identificadas. Acto seguido, dichas mediciones se exportan a un formato Excel para su posterior estudio mediante el software Matlab.

5.2. Ensayos de compresión

5.2.1 Marco teórico

El ensayo a compresión consiste en la aplicación de una carga de manera progresiva sobre las caras opuestas de la probeta, generando así un estado tensional uniaxial hasta llegar a la rotura de la misma para así poder obtener el valor último de carga. Existe dos formas de realizar el ensayo a compresión, una es teniendo un control de la presión del actuador ejercida sobre la probeta y otra es teniendo el control del desplazamiento del actuador. Ambas técnicas te permiten realizar el ensayo correctamente.

En este caso se ha optado por realizar el ensayo con control en desplazamiento ya que el actuador no va a realizar ningún movimiento anómalo. En cambio, si se hubiera optado por realizar un control en fuerza podría haber supuesto algún problema. Por ejemplo, en el último tramo del ensayo a compresión en el cual se somete la probeta hasta la rotura, la probeta una vez alcanza el punto máximo de resistencia, esta comienza a disminuir de manera considerable. Esto supondría un problema para el control en fuerza ya que el actuador trataría de buscar una fuerza que no puede llegar a aplicar porque la probeta no lo permite.

Para realizar el ensayo de compresión correctamente, se ha seguido la norma UNE – EN 14580:2005 en la que se abordan los métodos de ensayo para piedra natural y determinación del módulo de elasticidad estático.

Esta norma indica como se ha de realizar el ensayo de compresión para obtener los resultados deseados. Se indica que antes de someter a la probeta a un carga hasta la rotura, para así poder obtener su resistencia a compresión máxima, se ha de realizar ciclos de carga y descarga partiendo desde la tensión inicial σ_u a la tensión superior σ_o de acuerdo con el diagrama que se muestra en la figura 24. Estos ciclos de carga y descarga se han de realizar a una velocidad constante que en nuestro caso se ha definido dicha velocidad a 1 mm/min.

El ensayo a compresión que se va a realizar teniendo en cuenta que se va a ensayar una probeta de tapia, está compuesto por dos ciclos de carga los cuales se encuentran entre 0,2 kN de fuerza mínima y 2 kN en el punto con máxima fuerza. Estos dos ciclos iniciales tienen como objetivo principal asentar la probeta, haciendo que los pequeños asentamientos que se puedan dar en el interior de la probeta sucedan antes de ensayada hasta la rotura. Una vez realizado estos dos ciclos iniciales se introduce una pausa de 30 segundos a 0,2 kN previo al último ciclo de carga. Tras este periodo de tiempo tiene comienzo el último ciclo en el cual aumenta la carga compresión hasta que se produce la rotura de la probeta. Esta rotura se puede apreciar de manera visual en la probeta debido a la aparición de grietas con dimensiones bastante considerables, o si se observa durante el ensayo la gráfica de fuerza – desplazamiento del actuador, se puede apreciar una caída de la presión ejercida sobre la probeta.

En la figura que se muestra a continuación, se representa un ejemplo de diagrama tensión – tiempo utilizado para el ensayo a compresión.

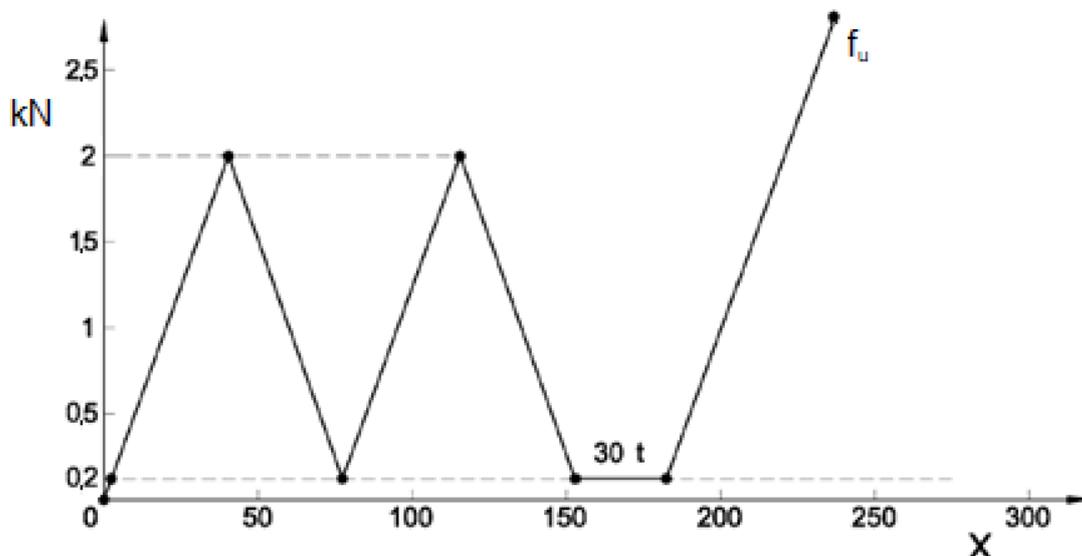


Figura 24. Diagrama tensión-tiempo para determinar el ensayo a compresión.

A continuación, se muestra una breve leyenda de la figura anterior.

1. El eje de abscisas (eje X) representa el tiempo de manera orientativa medido en segundos.
2. El eje de ordenadas (eje Y) representa la fuerza expresada en kN
3. $30 t$ es el periodo de tiempo en segundos que se mantiene la probeta descargada tras los dos ciclos iniciales antes de iniciar su último ciclo de carga hasta la rotura. Este periodo de tiempo es un lapso de 30 segundos.
4. f_u es la resistencia última de la probeta.

5.2.2 Descripción del equipo de medida

El equipo de medida utilizado para los ensayos destructivos está constituido por una máquina universal *MUF 401* de la marca *Servosis* especializada para la realización de ensayos dinámicos como de tracción, compresión o flexión. También cuenta con la capacidad de realizar ensayos cíclicos de hasta 100 Hz. La capacidad de carga que posee dicha maquina es de 200 KN, contando con un actuador cuya distancia máxima a recorrer es de 200 mm.

Para la toma de datos, además de las funcionalidades con las que cuenta la máquina de medida de fuerza mediante una célula de carga o desplazamiento a través de un captador lineal SSI entre otros, se han utilizado unas cámaras facilitadas por *Servosis* que permiten captar las deformaciones que sufre nuestra probeta a lo largo del ensayo. Estas cámaras funcionan con unos patrones que se incorporan a la probeta y para así poder mantener el control de desplazamiento producido entre ambos patrones.

A continuación, se muestra una imagen de la máquina universal utilizada para los ensayos destructivos.



Figura 25. Máquina utilizada para los ensayos de compresión.

5.2.3 Procedimiento de ensayo

El objetivo principal del ensayo compresión consiste en obtener las deformaciones que se produce en la probeta en función de la presión que se ejerce sobre esta. Para que esto tenga lugar, es necesario disponer correctamente el equipo de medida adicional con el que se cuenta que consiste en un equipo de videoextensometría de dos canales de la marca Servosis, comenzando por la creación de unas pequeñas laminas en las que se pegará el patrón mediante un adhesivo de doble cara. Se decidió que el patrón que se utilizaría para este ensayo es el de 5 mm.

Para mejorar la resolución de las cámaras los patrones deben estar situados a una distancia reducida, pero realmente mediante esta técnica se mide el desplazamiento relativo entre los puntos de la pletina donde se ha aplicado el adhesivo. La distancia entre los extremos de la pletina; donde se sitúa el adhesivo, es de 100 mm dejando así a los patrones en la zona central de la probeta. Las láminas se fijan a la probeta mediante una mezcla de adhesivo x60 de Ika marca HBM facilitado por el laboratorio de la Universidad.

A continuación, se muestra una imagen del adhesivo utilizado junto con las láminas que incluyen los patrones correctamente fijados.



Figura 26. Patrones de medida junto con el adhesivo utilizado.

Una vez se dispone de la probeta correctamente situada en la máquina de ensayos junto con las cámaras enfocando correctamente a los patrones, se procede a la configuración del software de *Servosis* para la utilización de las cámaras donde se variarán ciertos parámetros tales como el aspecto o el tamaño del patrón entre otros, para que la medición sea lo más precisa posible.

Acto seguido, se procede a la puesta en marcha de la máquina de ensayos. Esta parte es más compleja ya que al tratarse de un ensayo destructivo se ha de asegurar que todo este correctamente definido antes de que dé comienzo, además de aquellos parámetros de seguridad que bloquearán la máquina en caso de que suceda algo anómalo, como puede ser un incremento de fuerza no deseado o un desplazamiento del brazo no preestablecido.

Una vez que todos los dispositivos se encuentran correctamente configurados tiene comienzo el ensayo destructivo. Al finalizar, se tomarán fotos de la probeta ensayada para poder analizar por donde se produce la rotura y si tiene alguna relación con algún posible defecto visible. También se extraen los datos registrados para poder ser tratados posteriormente mediante *Matlab*.

A la hora de retirar la probeta de la máquina de ensayo, se extrae una muestra de la tongada central para poder llevar un control de la humedad durante el ensayo. El análisis de la humedad sigue el mismo procedimiento que se ha mencionado con anterioridad.



Figura 27. Proceso del ensayo destructivo.

6 RESULTADOS ENSAYOS ULTRASONIDOS

Para realizar el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de ultrasonidos, se ha decidido agrupar los resultados en función de las características de interés. Se va a realizar un estudio de gradientes donde se podrá detectar si existe algún patrón identificable que nos permita caracterizar el comportamiento de las probetas. También se va a realizar un estudio de la influencia de la edad, donde se podrá observar la evolución de las velocidades con el paso del tiempo. Por último, también se ha incluido un apartado donde se realizará la comparativa con respecto a la velocidad de propagación en las probetas con vidrio y sin vidrio.

La muestra poblacional para los ensayos de ultrasonidos es de 10 probetas para la edad de 30 días, siendo 5 probetas con vidrio y 5 probetas sin vidrio, 12 probetas para la edad de 60 días, siendo 6 probetas con vidrio y 6 probetas sin vidrio, 10 probetas para la edad de 90 días, siendo 5 probetas con vidrio y 5 probetas sin vidrio y 8 probetas, siendo 4 probetas con vidrio y 4 probetas in vidrio.

Tabla 7. Muestra poblacional de los ensayos de ultrasonidos.

Fecha	Con vidrio	Sin vidrio
30	5	5
60	6	6
90	5	5
120	4	4

6.1. Estudio de gradientes de compactación por probeta

Para realizar el estudio de gradientes de compactación por probeta, se ha decidido utilizar una gráfica de línea de puntos donde se representan la velocidad de propagación con respecto a cada punto de medida. Con la intención de poder analizar con más detalle todas las probabilidades que presentan los ensayos, se ha hecho una diferenciación entre las medidas longitudinales y transversales mediante los colores rojo y azul respectivamente. Una diferenciación en los planos de medida, donde los doce primeros números corresponden con el plano I mientras que los doce siguientes con el plano II. Cada probeta ensayada cuenta con una gráfica donde se recoge toda esta información comentada.

Para facilitar el estudio de tantas gráficas, se ha decidido organizarlas tanto por edades, como por su posición en el molde, como por el tipo de mezcla, situándose las probetas con vidrio a la izquierda y las probetas sin vidrio a la derecha.

En las figuras 28, 29, 30 y 31 que se muestran en la página siguiente se recogen los datos obtenidos separados por fechas.

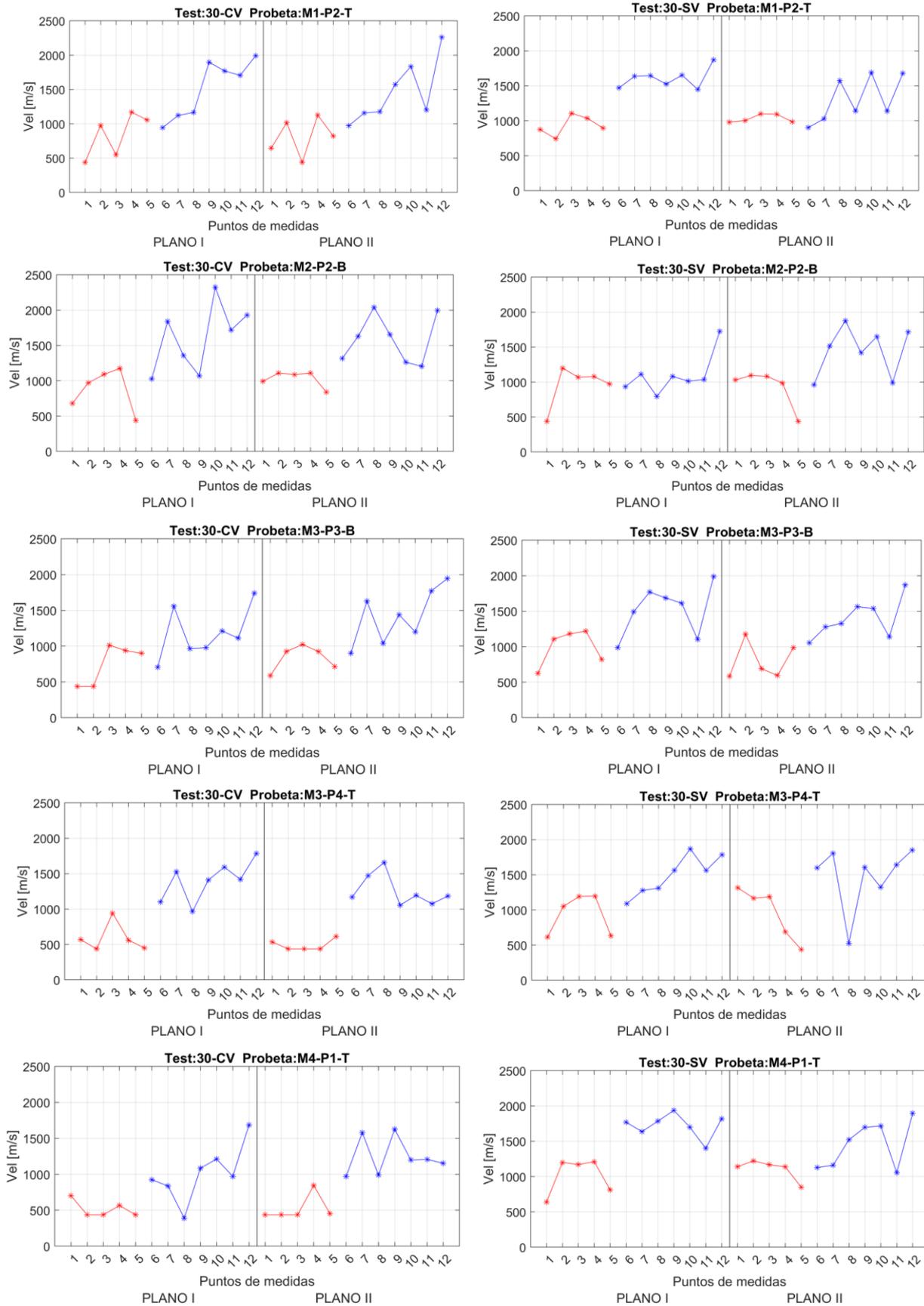


Figura 28. Velocidades de 30 días, diferenciado por probeta y tipología.

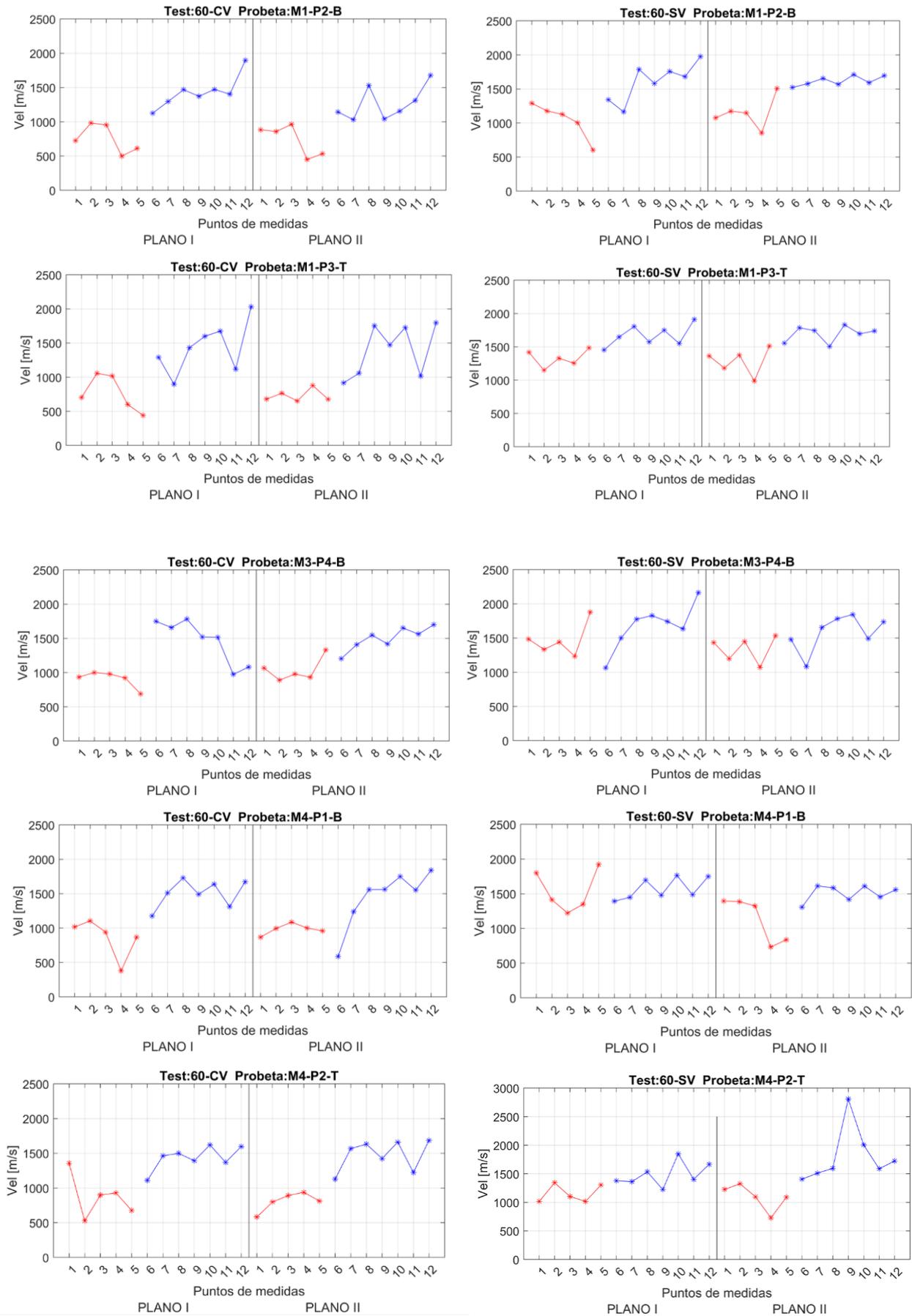


Figura 29. Velocidades de 60 días, diferenciado por probeta y tipología.

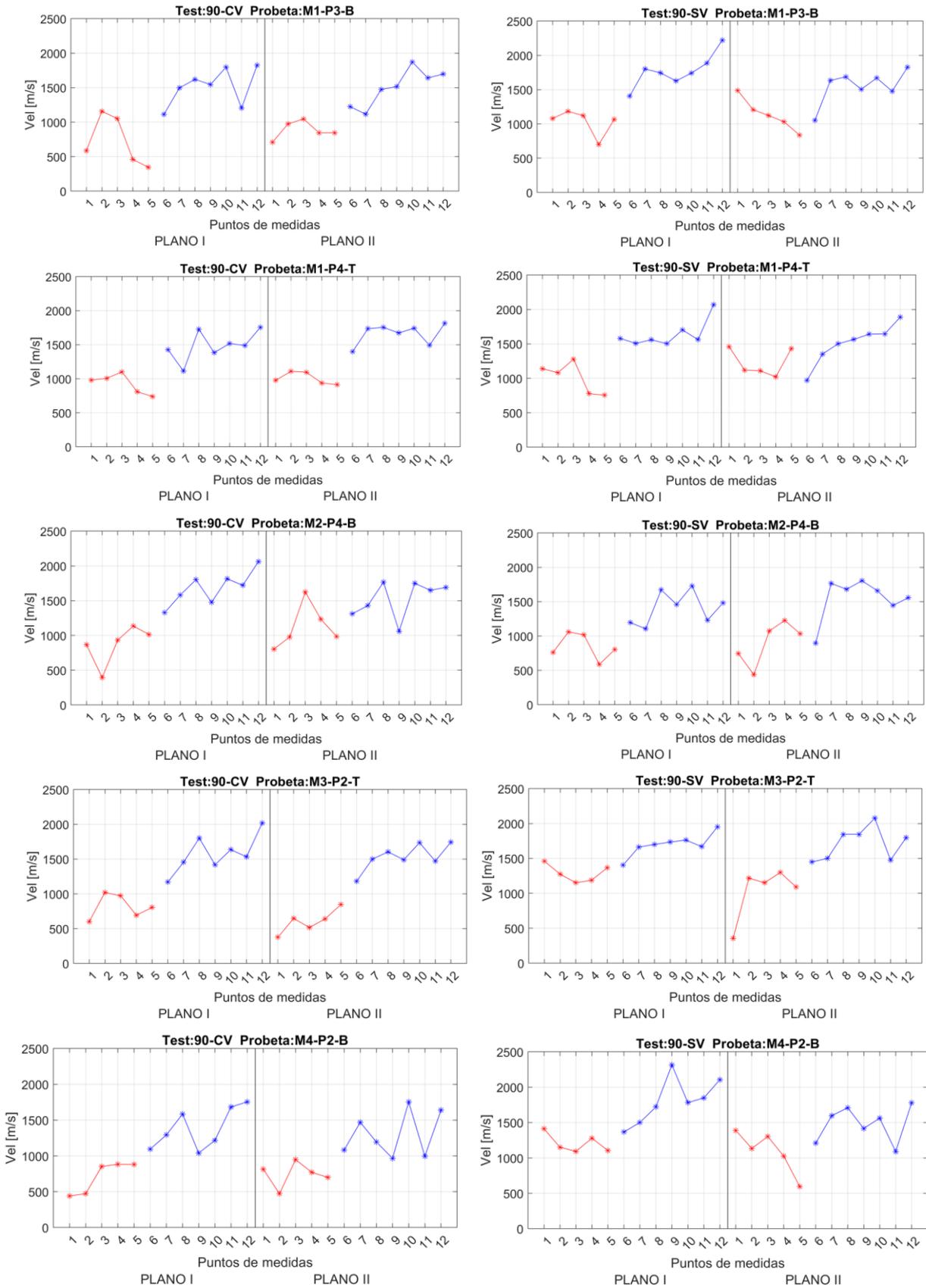


Figura 30. Velocidades de 90 días, diferenciado por probeta y tipología.

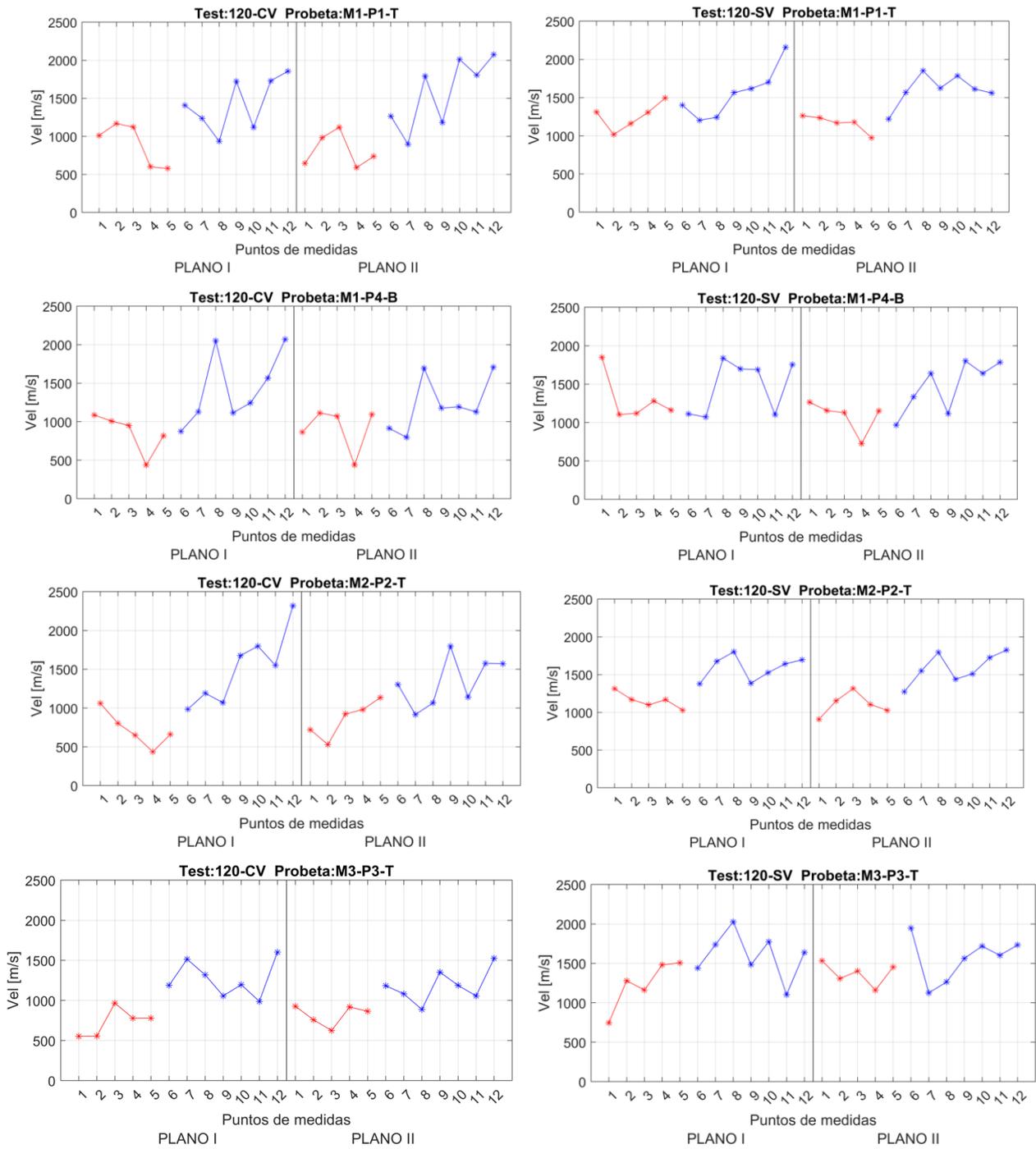


Figura 31. Velocidades de 120 días, diferenciado por probeta y tipología.

En cuanto a los resultados obtenidos se ha observado que una de las características que más se repite, es la presencia de picos y valles. Esto puede estar relacionado con el proceso de fabricación ya que la probeta se ha compactado mediante tongadas y esto hace que se existan diferentes capas en las cuales la cohesión de los materiales no tenga la homogeneización deseada. Este efecto de las diferentes capas en la infraestructura de la probeta, es una característica que se puede observar a simple vista, lo cual acentúa aún más esta hipótesis.

Otro patrón que se ha detectado en este estudio es el correspondiente a los puntos de medida de la última tongada (P10, P11 y P12). En estos puntos se aprecia una secuencia repetitiva tanto para las diferentes edades como para los dos tipos de probetas. El punto 11, siendo este el punto intermedio de la tongada, es inferior al de sus adyacentes. Una posible hipótesis, que confirma la influencia del estado de la tongada en la velocidad de propagación, consiste en que el punto 10 corresponde con el cambio de tongada; por lo que es posible que en según qué probeta no se haya logrado una cohesión perfecta entre ambas capas, mientras que en el punto 12 al ser el extremo de la probeta, únicamente se encuentra en contacto con la pieza medio palpador. Esta circunstancia también puede influenciar en la velocidad obtenida en este punto.

Si se analizan las mediciones realizadas de manera longitudinal, es decir en sentido de la compactación (P1 – P5), se puede observar que, salvo algún valor que dista bastante del resto de su grupo, sus valores poseen una cierta similitud, manteniéndose una tendencia horizontal. Esto entra dentro de lo esperado ya que a nivel longitudinal las posibles diferencias existentes en toda la pieza son únicamente las ocasionadas por alguna acumulación de algún árido grueso en algún punto específico de la probeta, o la inclinación en exceso de alguna capa intermedia; lo que implica que una sección transversal (tongada) se encuentra más compacta que el resto. En alguna ocasión puede llamar la atención los valores de los extremos P1 y P5, pero cabe destacar que en el proceso de medición este punto al estar situado en el borde de la probeta, únicamente se encuentra en contacto con el material medio palpador. En principio esto no debe suponer ningún problema, pero si se ha de tener en cuenta que la variabilidad de estos puntos puede ser superior al resto.

En cambio, si se analizan las mediciones transversales cuyos puntos de medida correspondientes son del P6 al P12, se observa la existencia de un gradiente ascendente siendo este último punto el de mayor velocidad. Esto se podría relacionar con el proceso de compactación ya que la energía de compactación que ha recibido la última tongada no es la misma que la primera. Esto se debe a que a pesar de que cada tongada se le aplica la misma energía de compactación. A la hora de realizar la segunda y tercera tongada, la primera sigue recibiendo cierta energía de manera indirecta debido a la superposición.

En cambio, según el artículo *Evaluating the performance of Sonic and ultrasonic test for the inspection of rammed earth construction* [21], llevado a cabo por José Daniel Rodríguez Mariscal, Jacinto Canivell y Mario Solís Muñoz publicado el 13 de septiembre de 2021, el anterior razonamiento carece de coherencia ya que es en las zonas más compactas donde se deberían detectar mayores velocidades. Sin embargo, en este caso las mayores velocidades se dan en la zona superior donde la compactación de las tongadas es ligeramente inferior al resto de la probeta. Para poder sacar una conclusión firme es necesario realizar más estudios que puedan esclarecer este comportamiento.

Un aspecto que resalta entre los resultados es el grado de anisotropía. Esta propiedad se detecta al comparar las velocidades en dirección vertical con las velocidades en dirección horizontal. Se puede apreciar como en la mayoría de los resultados existe una diferencia notoria entre estas dos direcciones siendo la dirección horizontal aquella que posee una mayor velocidad de propagación de onda.

6.2. Estudio influencia edad

Para estudiar la influencia de la edad es importante recordar que la fecha utilizada en la nomenclatura no corresponde con los días reales en los que se han realizado el ensayo, sino que son una aproximación del cronograma inicial que se llevó a cabo. Para este estudio en concreto es importante tener en cuenta este detalle ya que el intervalo de tiempo entre ensayos podría ser relevante. Para recordar estas fechas con una mayor exactitud fueron 35, 75, 105 y 135 días cada ensayo desde la fabricación de las probetas.

Para poder analizar la influencia de la edad en todos los datos recogidos se ha decidido realizar previamente un estudio estadístico del cual se han obtenido tanto la mediana como los percentiles 25 y 75 de cada punto de medida. Además de realizar una diferenciación por puntos de medida también se ha separado las probetas con vidrio y sin vidrio para así facilitar la comparativa entre ambos tipos de probeta.

Cabe destacar que las mediciones de las probetas para las diferentes edades no se realizaron en la misma probeta si no que las mediciones para cada intervalo de tiempo se tomaron del conjunto de probetas correspondiente a esa fecha.

A continuación, en las cuatro siguientes páginas se muestran las figuras 32, 33, 34 y 35 donde se recogen las gráficas para el estudio de la influencia de la edad donde las dos primeras corresponde a las probetas con vidrio y las dos siguiente a las probetas sin vidrio. Cada gráfica corresponde a un punto de medida las cuales también se encuentran colocadas de manera ascendente.

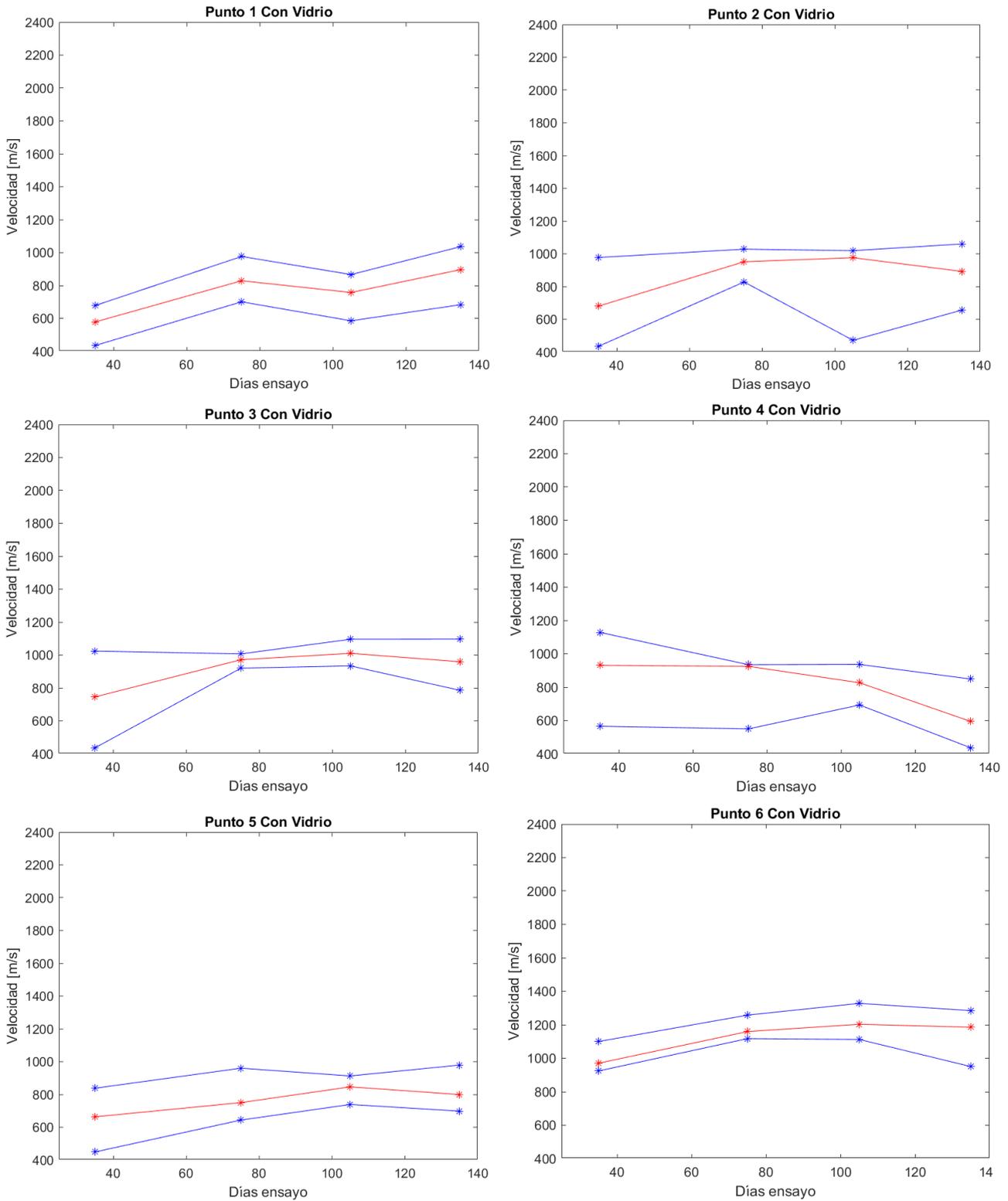


Figura 32. Graficas del punto 1 – 6 con vidrio de la evolución de la velocidad con respecto al tiempo, siendo la línea roja la mediana y las líneas azules los percentiles 25 y 75.

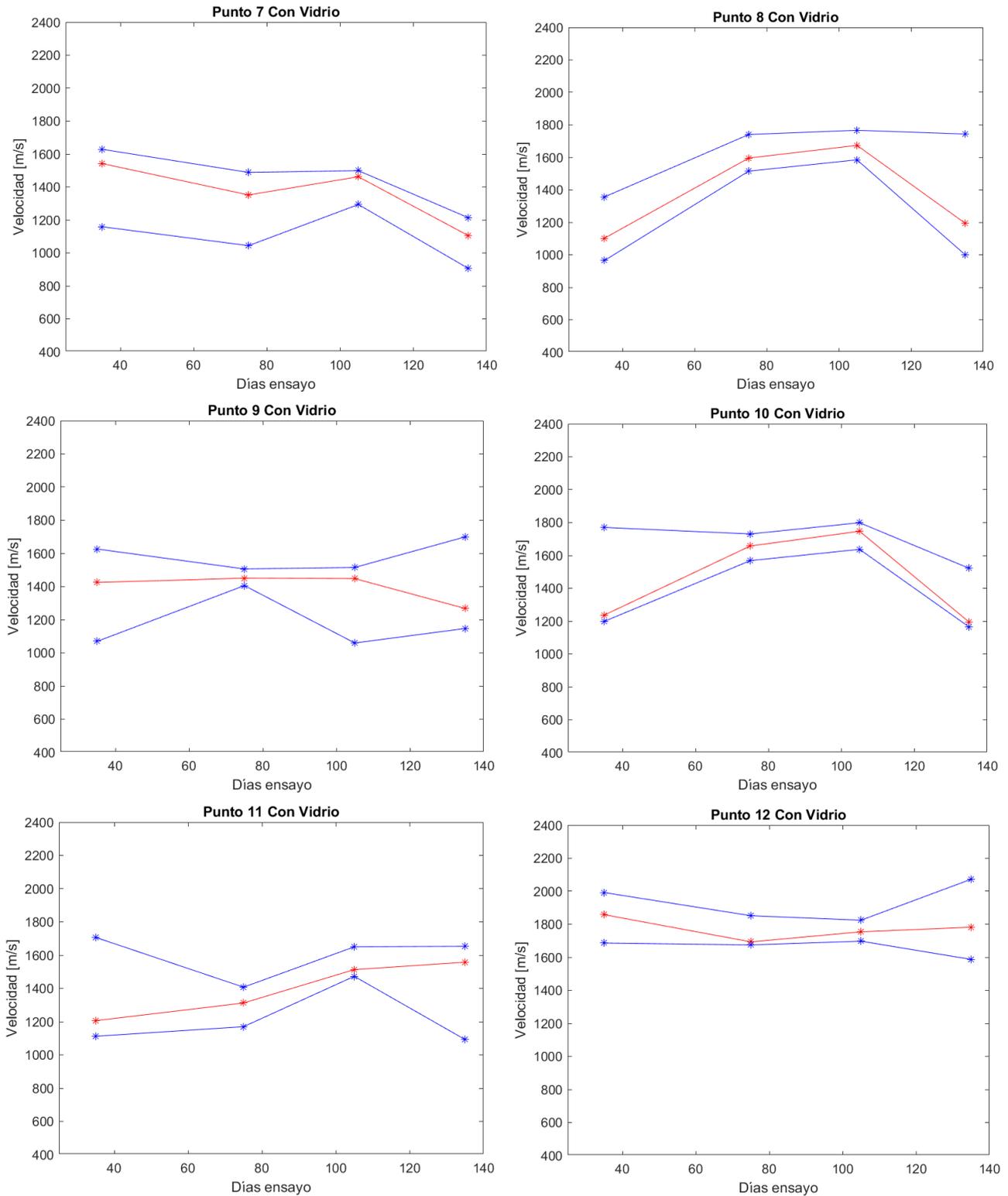


Figura 33. Graficas del punto 7 – 12 con vidrio de la evolución de la velocidad con respecto al tiempo, siendo la línea roja la mediana y las líneas azules los percentiles 25 y 75.

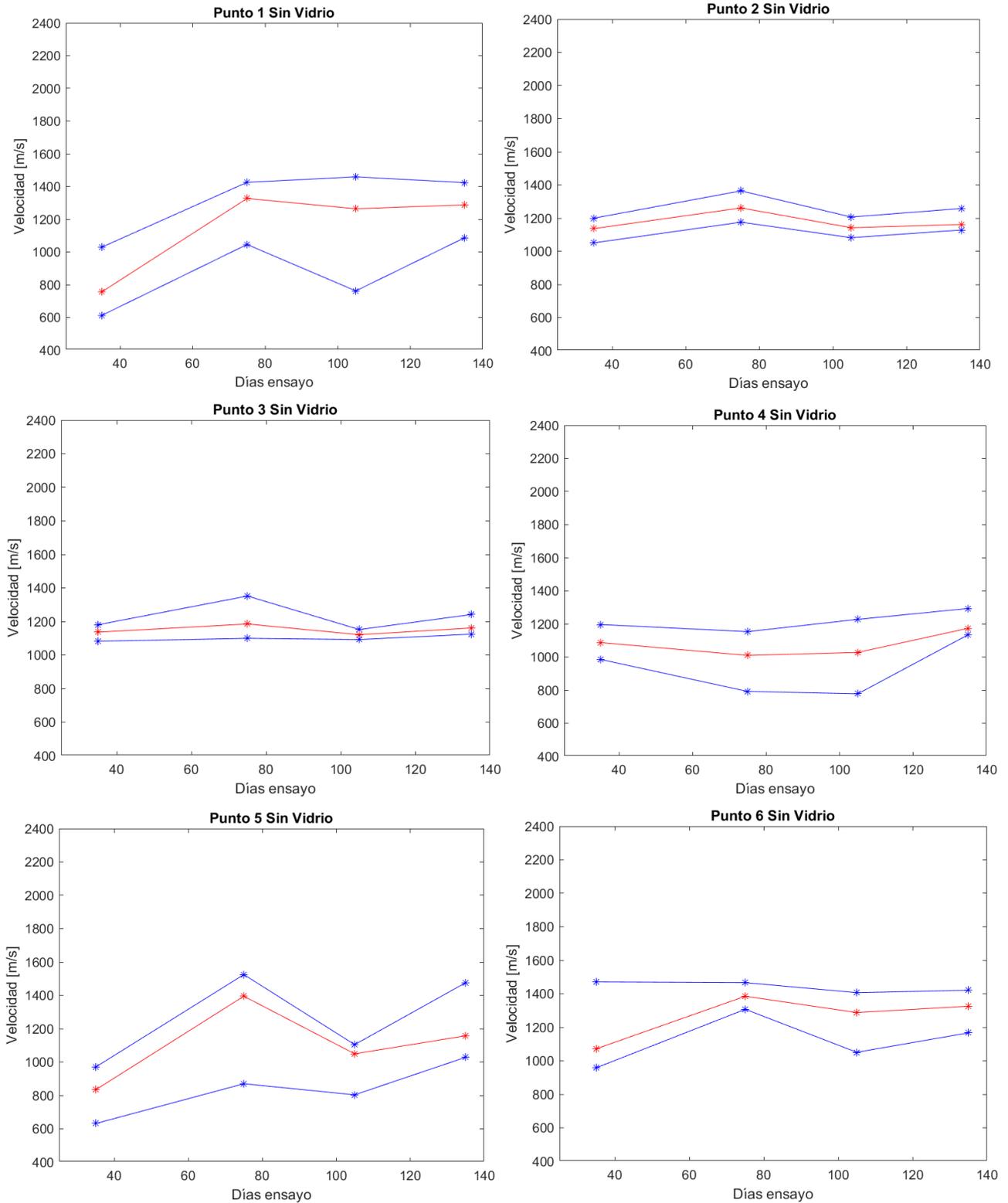


Figura 34. Graficas del punto 1 – 6 sin vidrio de la evolución de la velocidad con respecto al tiempo, siendo la línea roja la mediana y las líneas azules los percentiles 25 y 75.

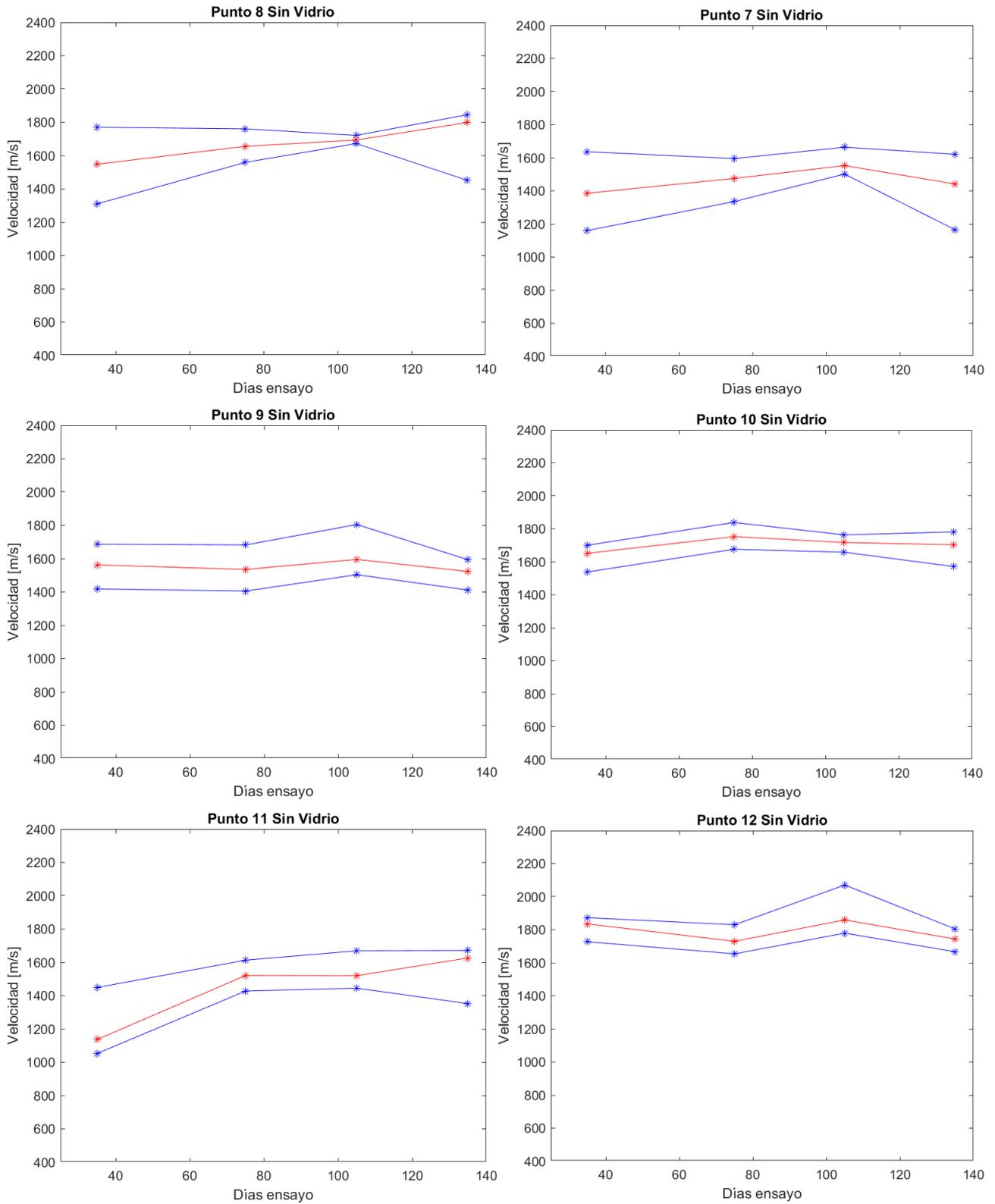


Figura 35. Graficas del punto 7 – 12 con vidrio de la evolución de la velocidad con respecto al tiempo, siendo la línea roja la mediana y las líneas azules los percentiles 25 y 75.

En cuanto a los valores obtenidos, representados en las gráficas de líneas de puntos, se puede observar que no existe una tendencia que se repita en todos los puntos de medida. Esto implica que el efecto que tiene el paso del tiempo en la velocidad de propagación de una onda puede estar directamente relacionado con la heterogeneidad de la probeta. Esto implica que una mayor heterogeneidad en el proceso de fabricación conlleva una mayor heterogeneidad en el proceso de curado. En este efecto también influyen en menor medida las diferentes características propias de cada punto de medida, como puede ser la posición del punto, siendo los de la parte inferior aquellos que han recibido mayor energía de compactación.

Una tendencia que no se aprecia en los resultados es el aumento continuado de la velocidad. El hecho de que la velocidad no vaya en aumento con el paso del tiempo genera una cierta incertidumbre para la cual es necesaria realizar más estudios para poder determinar con mayor precisión el comportamiento de la tapia con vidrio triturado.

Si se observan los intervalos de tiempo por separado, a pesar de algún caso excepcional, el periodo de tiempo en el cual ha habido un mayor incremento de la velocidad es en el inicial. Esto se debe a que es el periodo en el que se producen más cambios en la probeta debido a las reacciones químicas que están teniendo lugar como la carbonatación o la pérdida de humedad por el proceso de secado al aire libre.

6.3. Comparación con/sin vidrio

Para profundizar más en la comparativa que se ha realizado en los anteriores apartados respecto a los dos tipos de probetas; con vidrio y sin vidrio, se ha decidido hacer un estudio estadístico. Para ello, se ha optado por utilizar un diagrama de cajas permitiendo así poder representar gráficamente una serie de datos a través de sus cuartiles. Este método permite identificar a simple vista la mediana, la cual se representa mediante una línea roja, los percentiles 25 y 75 situados en el extremo superior e inferior respectivamente, mediante dos bigotes se indican los valores más extremos sin ser considerados atípicos y, por último, la existencia de algún posible valor atípico representado con el marcador '+’.

Estos diagramas de cajas también se han organizado por puntos de medida, al igual que en la representación de las velocidades de propagación mediante líneas de puntos. No obstante, también existe una diferenciación entre edades y composición utilizada. Tanto la distribución utilizada como el método para realizar este estudio por el que se ha optado, permitirá poder identificar de una manera más global la existencia de gradientes, patrones o cualquier tipo de indicio que permita caracterizar la probeta.

En la figura 36 que se muestra en la página siguiente se puede observar las gráficas utilizadas para la comparativa con/sin vidrio basándose en los diagramas de cajas.

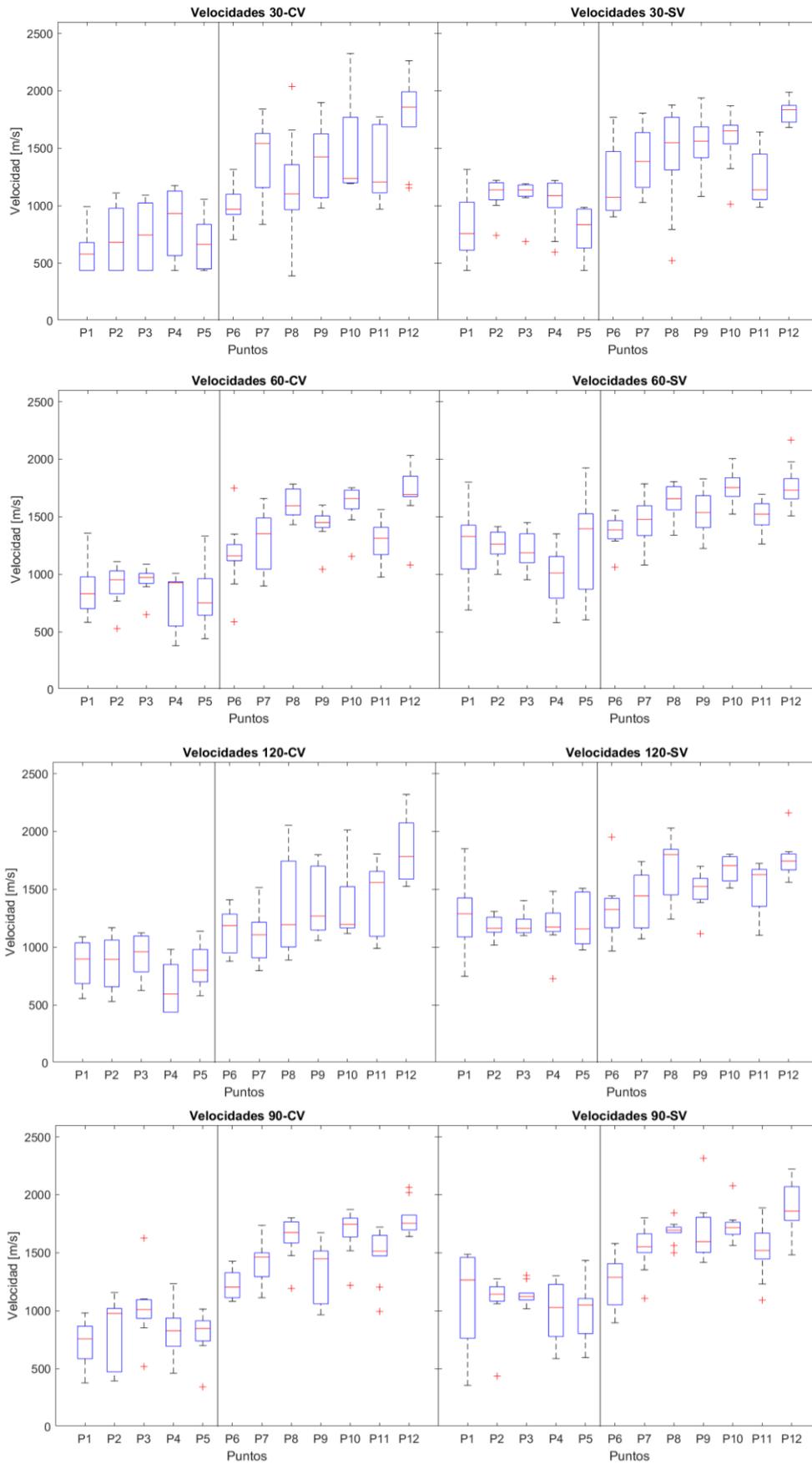


Figura 36. Gráficas con diagramas de cajas que representan la velocidad por punto de medida.

En cuantos a la comparativa a realizar entre las probetas con vidrio y sin vidrio, en las gráficas anteriores se aprecia que ambas tipologías poseen características muy similares. Si se observan los valores de la velocidad de una forma general, se puede apreciar que los valores obtenidos para las probetas sin vidrio son ligeramente superiores a las probetas con vidrio.

Una posible hipótesis para este caso está relacionada con la porosidad. Si bien en la tabla 6 del subapartado 4.7 *Densidad y Porosidad* se vio como tanto para las probetas con vidrio como sin vidrio la porosidad era similar. De manera visual, durante la experimentación, se apreciaba una mayor porosidad superficial en las probetas con vidrio. El hecho de que esta diferencia de porosidad sea superficial puede que no afecte tanto al ensayo de porosidad, ya que se obtiene una muestra de la parte central de la tongada intermedia, y si afecte directamente al ensayo de ultrasonidos. Esta porosidad está asociada al proceso de fabricación y afecta de tal manera que entre el palpador y la superficie queden varios orificios sin material. El hecho de encontrar poros en el trayecto del sonido afecta a la velocidad viéndose reducida. Otro hecho que afecta a esta situación es que no se utilizó gel para el palpador, lo cual hubiera disminuido el efecto de estos defectos superficiales.

7 RESULTADOS ENSAYOS COMPRESIÓN

Para realizar el estudio de los resultados obtenidos en los ensayos de compresión, se ha decidido agrupar los resultados en función de las características de interés. Se va a realizar un estudio donde se analiza la influencia de la posición en el molde durante el proceso de fabricación. Haciendo una diferenciación entre las probetas que están en la parte superior y las de la zona inferior. También se hacen diferencias en función de la edad y el tipo de probeta. Al igual que en el estudio de ultrasonidos, también se va a analizar cómo afecta el paso del tiempo en la resistencia de las probetas a compresión. En esta ocasión se ha hecho hincapié en la influencia de la humedad, por lo que se va a analizar la evolución de la humedad con el paso del tiempo y también la evolución de la resistencia con respecto a la humedad, ya que esta no permanece constante. Para finalizar, al igual que en el apartado anterior de resultados del ensayo de ultrasonidos, se ha realizado un comparativa entre las probetas con vidrio y las probetas sin vidrio.

Un aspecto que se ha de tener en cuenta durante el análisis de todos los resultados de compresión, es el hecho de que las probetas de la primera remesa para 30 días, no se les ha realizado la operación de refrentado por lo que la comparativa con el resto de las probetas no es del todo correcta. Este efecto del refrentado no se puede obviar ya que se considera que tuvo un efecto directo en los ensayos de compresión debido que las cargas aplicadas en las probetas refrentadas, se reparten de una manera mucho más homogénea por la superficie de contacto.

Durante esta campaña de investigación se ha realizado más estudios especialmente con relación a los ensayos de compresión, los cuales no son objetos de este proyecto. Dichos estudios se llevaron a cabo por mi compañero de proyecto Manuel Antonio Gallardo Navarro. Se pueden consultar en su trabajo fin de grado con el nombre de *Comportamiento a compresión de tapia con residuo de vidrio incorporado y estabilizadas con cal* [9].

7.1. Influencia de la posición en el molde durante la fabricación

Para estudiar la influencia de la posición en el molde durante el periodo de fabricación se ha decidido representar mediante puntos los valores de resistencia de las diferentes probetas. En esta ocasión, únicamente se hace una distinción entre las probetas de la posición inferior y superior dentro del molde, siendo los puntos identificativos rojo y azul respectivamente. Se ha decidido no indagar más en las diferentes posiciones que tiene la probeta en el molde ya que se consideran menos relevantes que las que se van a estudiar, además de no se haber encontrado ningún patrón que indique que la diferenciación de columnas dentro del molde influya directamente en los resultados. El estudio que se ha decidido hacer posee un especial interés ya que, debido al proceso de fabricación, a la hora de realizar la compactación, la energía que reciben la probetas de la zona inferior es superior a las de la parte de arriba ya que por superposición estas se ven afectadas. En las gráficas que se van a poder ver a continuación, también se ha realizado una distinción de fechas y con vidrio/sin vidrio, lo que permitirá poder comparar los resultados entre sí y poder tener una idea inicial de cómo afecta el paso del tiempo a la resistencia.

A continuación, en la página siguiente se muestra la figura 37 que representa la influencia de la posición en la resistencia de las probetas.

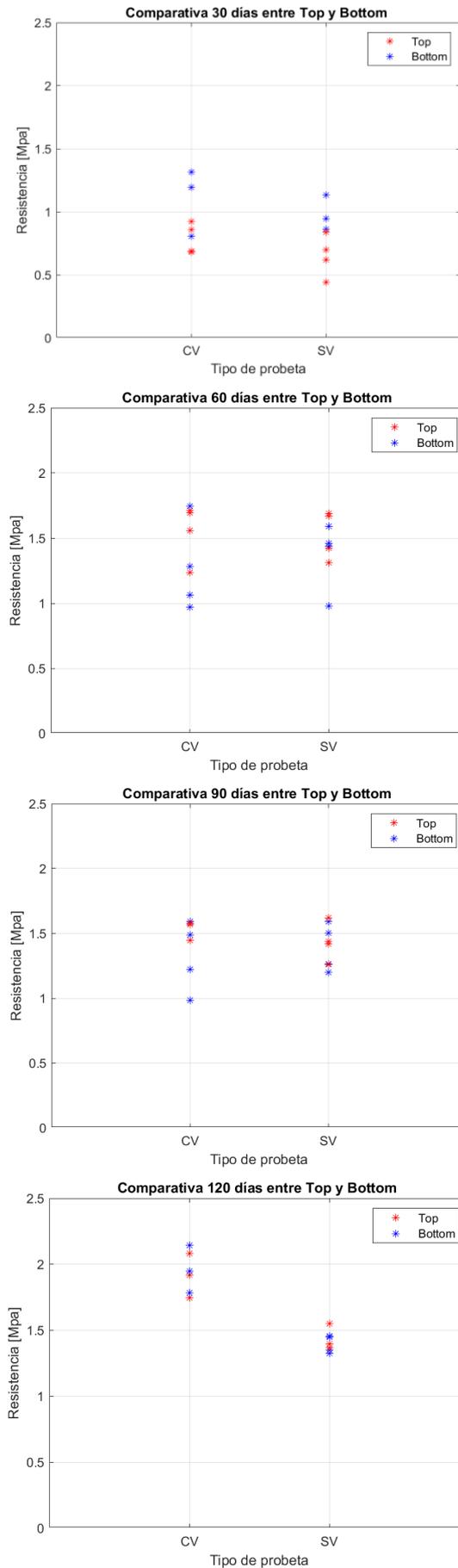


Figura 37. Influencia de la posición en el molde en la resistencia de las probetas.

Como objeto principal de este apartado se comenzará analizando la influencia que tiene la posición en el molde durante el proceso de fabricación con respecto a la resistencia final obtenida. Para ello, cabe destacar que en la primera remesa de probetas no se realizó la operación de refrentado por lo que la comparativa con el resto de las probetas no es del todo correcta. Este efecto del refrentado no se puede obviar ya que se considera que tuvo un efecto directo en los ensayos de compresión debido que las cargas aplicadas en las probetas refrentadas se reparten de una manera mucho más homogénea por la superficie de contacto.

Si se comparan los valores de las probetas de 30 días entre sí; ya que las condiciones son iguales, se puede apreciar como todas las probetas de la parte inferior del molde poseen una mayor resistencia. Como en el resto de los periodos no se puede apreciar una distinción tan notoria, una posible hipótesis que explica esto es que las probetas de la parte inferior obtenían un mayor paralelismo entre caras ya que su parte inferior coincidía con la base del molde; la cual es completamente horizontal. En cambio, la cara inferior de la probeta superior depende directamente de la planitud que poseyese la cara superior de la probeta inferior. Este mayor paralelismo entre la cara superior y la inferior de las probetas de la parte inferior, implica que la carga se distribuya de manera más homogénea a la hora de realizar el ensayo.

Un aspecto que se puede apreciar en estas gráficas, a pesar de no ser objeto de este apartado es la influencia del tiempo en la resistencia de las probetas. Salvando las diferencias existentes entre las probetas de 30 días con el resto, se puede apreciar como la dispersión de los valores con forme pasa el tiempo disminuye, llegando a obtener unos valores muy similares para las probetas de la parte superior del molde y las de la parte inferior.

7.2. Estudio influencia edad en la resistencia de probetas

Para estudiar la influencia de la edad es importante recordar que la fecha utilizada en la nomenclatura no corresponde con los días reales en los que se han realizado el ensayo, sino que son una aproximación del cronograma inicial que se llevó a cabo. Para este estudio en concreto, es importante tener en cuenta este detalle ya que el intervalo de tiempo entre ensayos podría ser relevante. Para recordar estas fechas con una mayor exactitud fueron 35, 75, 105 y 135 días cada ensayo desde la fabricación de las probetas.

Para poder analizar la influencia de la edad en todos los datos recogidos se ha decidido realizar previamente un estudio estadístico del cual se han obtenido tanto la mediana como los percentiles 25 y 75 de cada punto de medida. Además de realizar una diferenciación por puntos de medida también se ha separado las probetas con vidrio y sin vidrio para así facilitar la comparativa entre ambos tipos de probeta.

A continuación, en las figura 38 y 39, se muestra una evolución de la resistencia con el paso del tiempo mediante diagramas de barras.

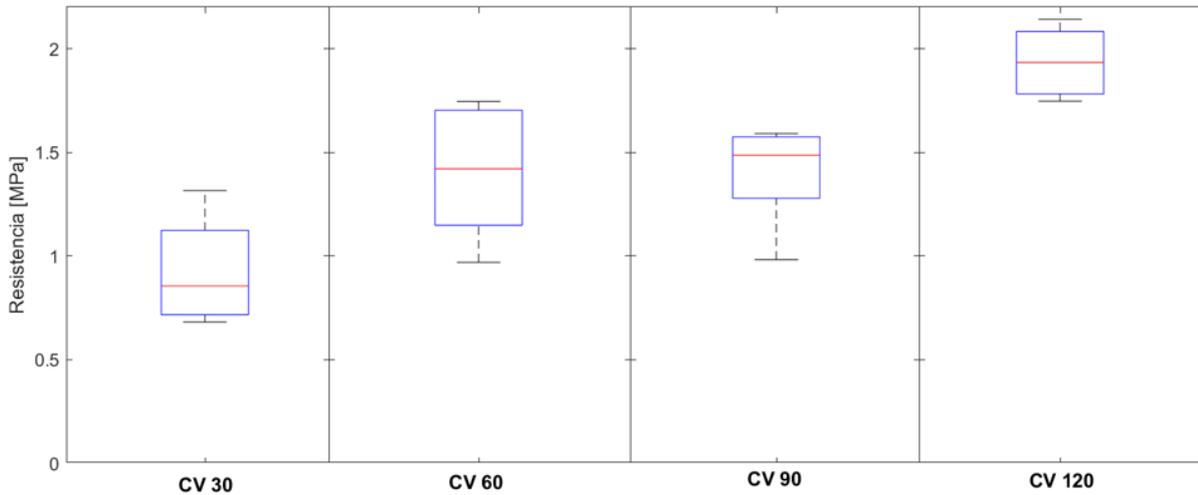


Figura 38. Influencia de la edad en la resistencia de probetas con vidrio

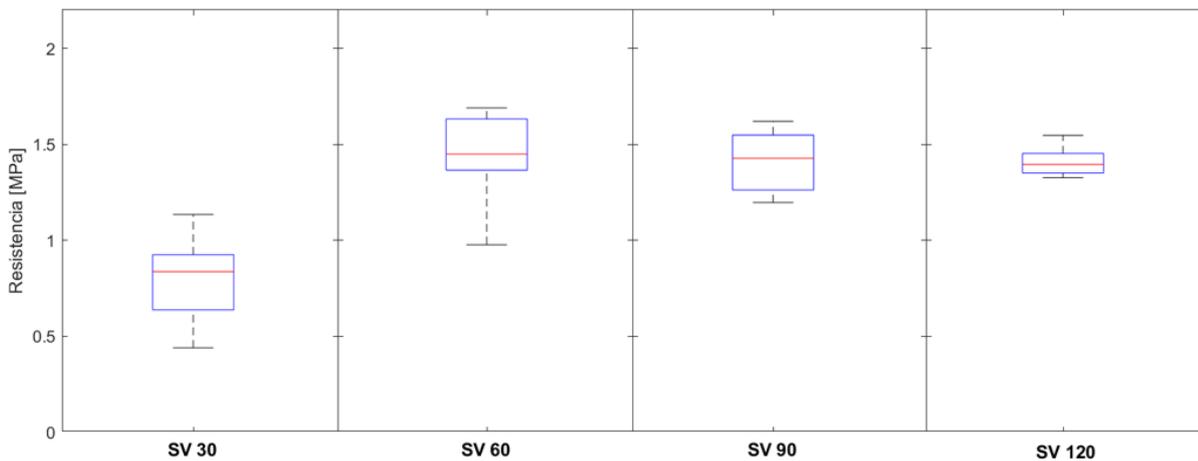


Figura 39. Influencia de la edad en la resistencia de probetas sin vidrio

El periodo de tiempo más largo entre ensayos es el inicial, en el cual se tardaron 10 días más en realizar los ensayos que en el resto de los periodos. Esto junto con el hecho de que los ensayos a compresión para las probetas de 30 días no tuvieron realizado la operación de refrentado dificulta su comparativa con el resto de las probetas.

En cuanto a las probetas con vidrio se puede apreciar una ligera tendencia al aumento de resistencia, salvo en el último periodo de tiempo en el que este aumento es bastante superior al resto de fechas. Para los valores intermedios de 60 y 90 días, la evolución ha sido muy ligera siendo unos valores prácticamente similares. Con respecto a la etapa inicial, sí que se aprecia una clara evolución, pero esta no se puede cuantificar debido a los factores anteriormente descritos.

Para las probetas sin vidrio la evolución es menos evidente, ya que, si no se tiene en cuenta las probetas iniciales de 30 días para obtener una conclusión general, sus valores son prácticamente idénticos.

A pesar de considerar que no tenemos las muestras suficientes para tal afirmación, se podría pensar que la influencia de la edad tiene un mayor peso en las probetas con vidrio, ya que es donde se aprecian mayores cambios con el paso del tiempo.

7.3. Evolución de la humedad con respecto al tiempo

En este apartado se va a analizar la evolución de la humedad con respecto al tiempo y para ello es importante recordar que la fecha utilizada en la nomenclatura no corresponde con los días reales en los que se han realizado el ensayo, sino que son una aproximación del cronograma inicial que se llevó a cabo. Para este estudio en concreto es importante tener en cuenta este detalle ya que el intervalo de tiempo entre ensayos podría ser relevante. Para recordar estas fechas con más exactitud fueron 35, 75, 105 y 135 días cada ensayo desde la fabricación de las probetas.

Para representar correctamente esta la evolución de la humedad y debido al elevado registro de valores, se ha optado por utilizar los datos estadísticos correspondientes. Para ello se han obtenido los valores tanto de la mediana como de los percentiles 25 y 75. La gráfica utilizada para plasmar los resultados, es una línea de puntos al igual que se ha utilizado en apartados anteriores. En la parte central de color rojo está representada la mediana mientras que a sus extremos se encuentran los percentiles de color azul. En cada punto se recoge el valor estadístico correspondiente de todas las probetas ensayadas en esa fecha. Para diferencia entre las probetas con vidrio y sin vidrio se ha realizado dos gráficas, una para cada tipo, donde se puede apreciar con varía la humedad con el paso del tiempo según la composición utilizada en el proceso de fabricación.

A continuación, en la figura 40 se muestra la evolución de la humedad con el respecto al tiempo.

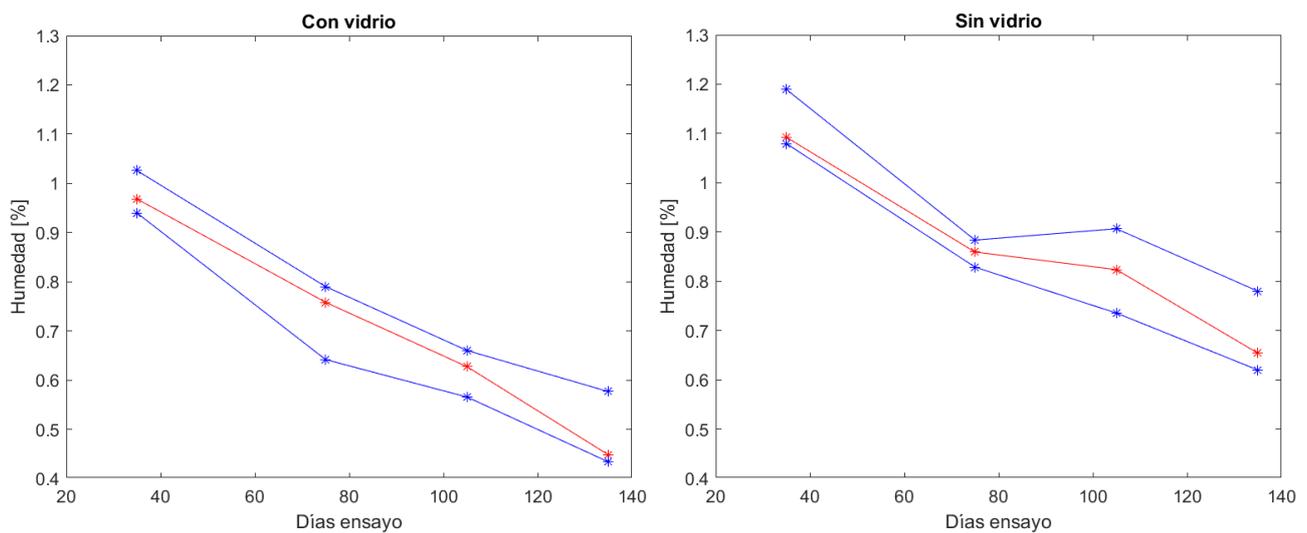


Figura 40. Evolución de la humedad con respecto del tiempo.

Un aspecto que se puede analizar de la evolución de la humedad con respecto al tiempo, es cómo influye la presencia del vidrio en las probetas, ya que como era de esperar, en las gráficas anteriores se puede apreciar que la humedad disminuye con respecto al paso del tiempo.

Para poder analizar correctamente este efecto es necesario tener en cuenta las fechas en las que se llevó a cabo este proyecto ya que la variación de humedad está condicionada por las condiciones ambientales. El tramo final de los ensayos coincide con el comienzo del verano por lo que es de esperar que en estos últimos intervalos haya una mayor variación de humedad.

Se realizó un registro tanto de la temperatura como de la humedad desde el 7 de abril del 2022 hasta el 9 de agosto del 2022. A continuación, se muestra la gráfica donde se recogen estos valores.

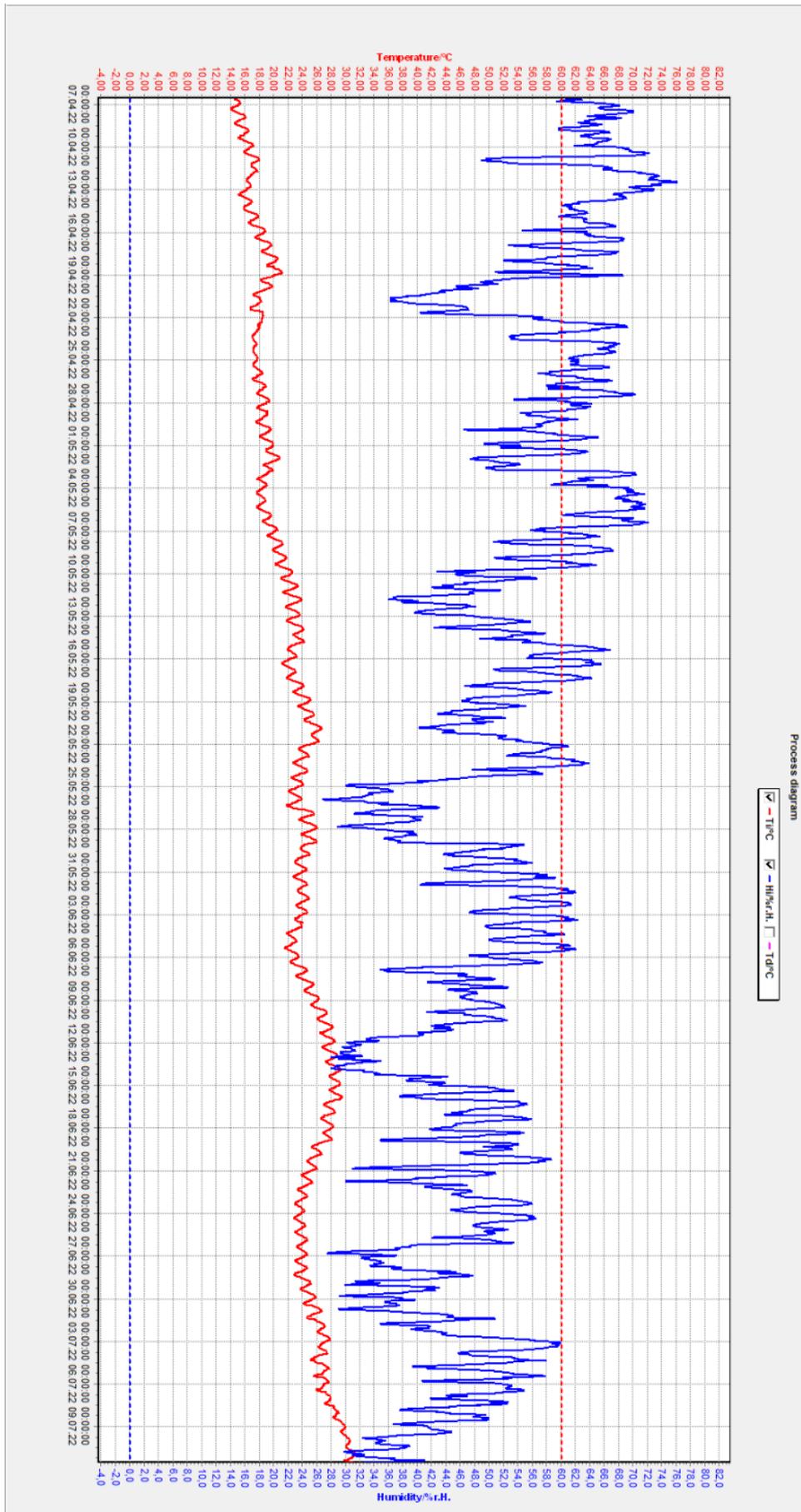


Figura 41. Registro de temperatura y humedad durante toda la experimentación.

En esta gráfica se puede apreciar claramente como con el paso del tiempo las temperaturas van en aumento hasta alcanzar los 30 °C, mientras que la humedad disminuye.

En cuanto al análisis de la evolución de la humedad con respecto al paso del tiempo de la figura 40, para el caso de las probetas con vidrio, la humedad disminuye de manera prácticamente lineal. En cambio, para las probetas sin vidrio se puede apreciar cierta linealidad, pero la cual se ve afectada en el periodo de 60 a 90 días en el cual se reduce esta tendencia descendente manteniendo una mayor horizontalidad.

Si se tiene en cuenta que el periodo inicial de 35 a 75 días reales, es superior al resto por 10 días, se puede concluir que el tramo en el que se detecta una mayor variación en la humedad es en el final, donde se aprecia una mayor pendiente en la figura 40 anteriormente mostrada.

7.4. Evolución de la resistencia respecto a la humedad

Para analizar la evolución de la resistencia respecto a la humedad, se ha decidido por representar en un gráfico x-y para ver la distribución de los puntos. Esta nube de puntos nos permite de manera muy directa y visual poder hacer una rápida distinción entre la humedad y resistencia para ambos tipos de probetas. En este caso como se indica en la leyenda de las correspondientes gráficas, los puntos rojos representan a las probetas con vidrio mientras que el color azul representa las probetas sin vidrio.

La selección de representar los datos de esta manera permite poder analizar la humedad y resistencia por separado, mirando que tipo de probeta posee un mayor porcentaje de humedad o mayor resistencia, y también en conjunto, valorando si un porcentaje elevado de humedad implica una mayor o menor resistencia o no directamente no se apreciase ningún tipo de relación.

En las gráficas de la figura 42 que se muestra en la página siguiente, también se ha realizado una distinción por edades, relación cada gráfica con una edad en concreto. Esto permitirá conocer la evolución de la resistencia con respecto a la humedad.

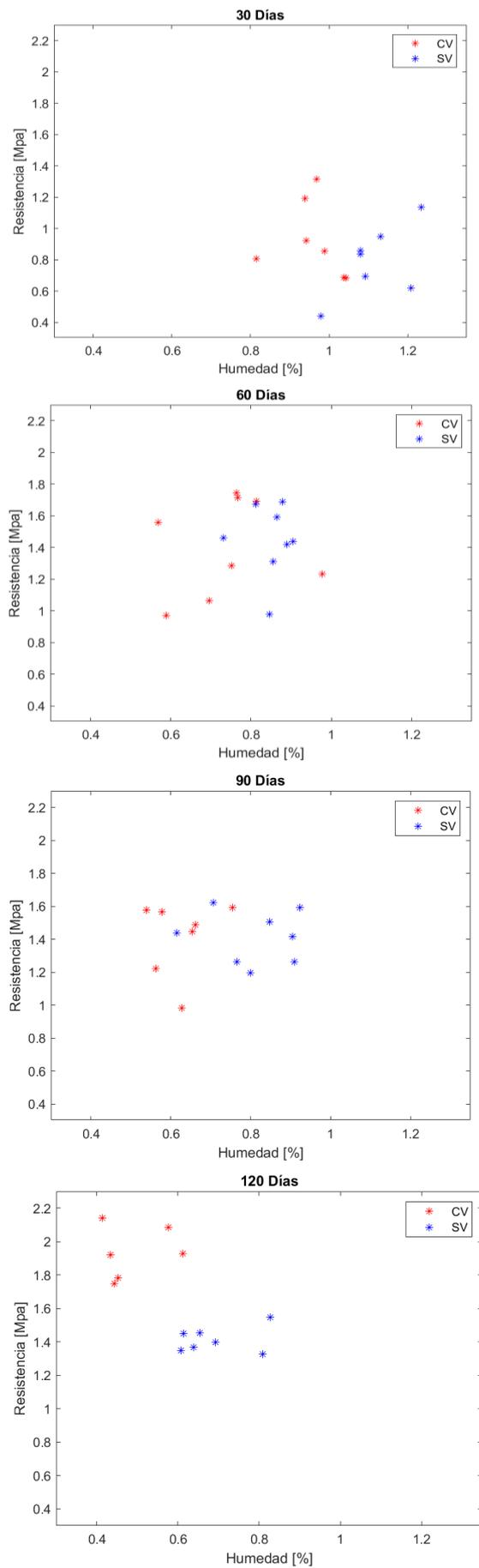


Figura 42. Evolución de la resistencia con respecto a la humedad.

El método de representación de los datos por nube de puntos de diferentes colores para los dos tipos de probetas, permite de una manera muy visual y directa poder analizar más en profundidad la comparativa entre la resistencia y humedad.

Si se analizan primero las dos características por separado, se puede comprobar como para la resistencia a compresión, su valor va aumentando con el paso del tiempo como se ha comentado anteriormente. Además, se puede apreciar en todas las gráficas, salvo para la de 120 días, como es bastante indiferente la tipología de probeta. En este último caso, son las probetas con vidrio las que presentan una mayor resistencia frente al ensayo de compresión.

Si se analiza la humedad por separado, al igual que en apartado anterior se observa como su valor disminuye con el paso del tiempo. Se puede apreciar como las probetas sin vidrio, por norma general poseen una mayor humedad que las probetas con vidrio. Esto sucede para todas las fechas estudiadas. Es posible que esto se deba a su composición ya que aquellas que no poseen vidrio son capaces de absorber una mayor cantidad de agua debido a que poseen una mayor cantidad de arena.

Si ahora se analiza la resistencia en relación con la humedad, existe una hipótesis que determina que, a mayor humedad, menor resistencia. Cabe destacar que existen más factores que afectan directamente a la resistencia de la probeta, por lo que esta hipótesis hay que tratarla con cautela. El razonamiento para haber llegado a esta conclusión radica en que para los valores de humedad próximos al 0.8% que son las probetas sin vidrio tanto para 60, 90 y 120 días, sus valores de resistencia correspondientes son muy similares. En cambio, para 120 días con vidrio, se reduce su humedad con respecto a las probetas de 60 y 90 días y se aprecia un claro aumento de resistencia.

7.5. Comparación con/sin vidrio

Para profundizar más en la comparativa que se ha realizado en los anteriores apartados respecto a los dos tipos de probetas; con vidrio y sin vidrio, se ha decidido hacer un estudio estadístico. Para ello, se ha optado por utilizar un diagrama de cajas permitiendo así poder representar gráficamente una serie de datos a través de sus cuartiles. Este método permite identificar a simple vista la mediana, la cual se representa mediante una línea roja, los percentiles 25 y 75 situados en el extremo superior e inferior respectivamente, mediante dos bigotes se indican los valores más extremos sin ser considerados atípicos y, por último, la existencia de algún posible valor atípico representado con el marcador ‘+’.

Estos diagramas de cajas también se han organizado por tipo de probetas con vidrio/sin vidrio. No obstante, también existe una diferenciación entre edades.

El objeto principal de este apartado no consiste en presentar todas las similitudes y diferencias entre las probetas con vidrio y sin vidrio, o recoger todas las comparaciones realizadas en apartados anteriores, sino que se centra en comparar la resistencia a compresión entre ambos tipos de probetas.

En la figura 43 que se muestra en la página siguiente se puede observar las gráficas utilizadas para la comparativa con/sin vidrio basándose en los diagramas de cajas.

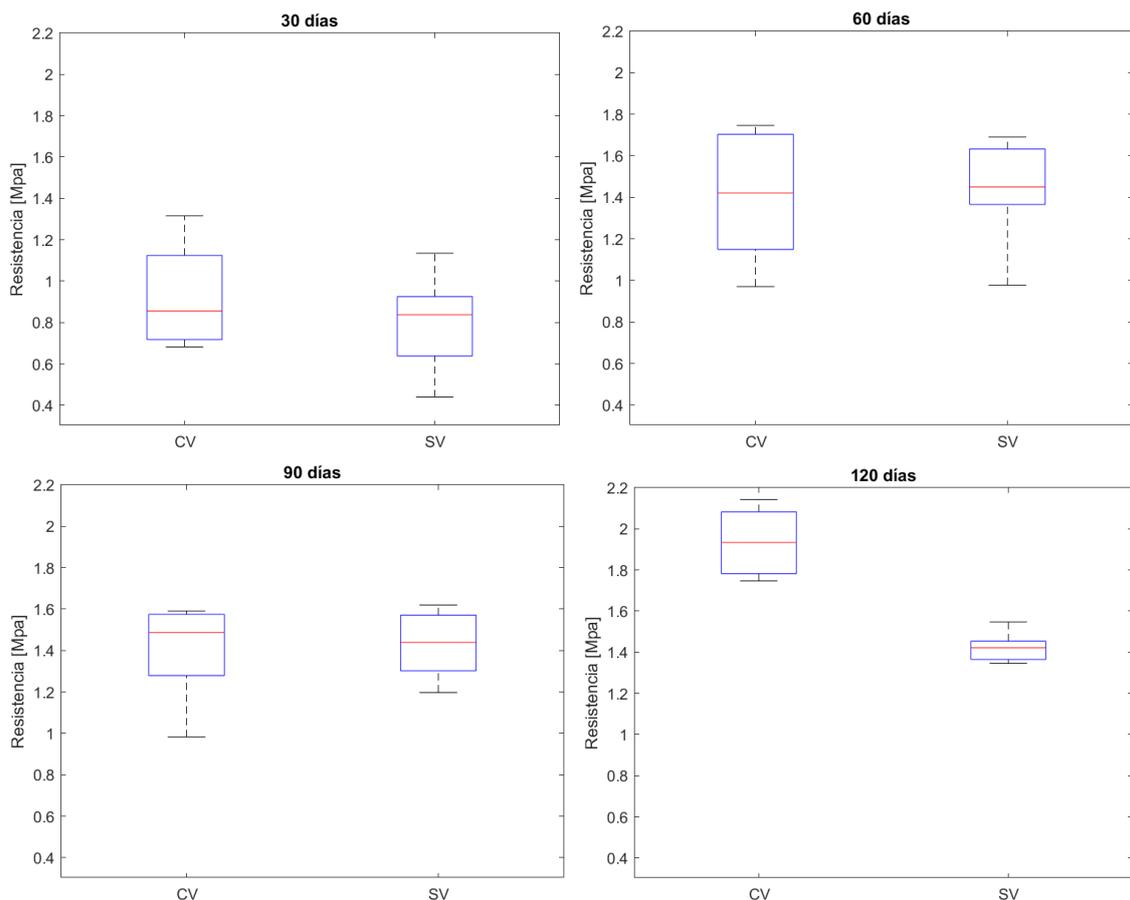


Figura 43. Comparativa de la resistencia entre las probetas con vidrio y sin vidrio.

Si se analiza primero las probetas de 30, 60 y 90 días se observa claramente que tanto la resistencia para las probetas con vidrio como para las probetas sin vidrio son muy similares. Además, salvo por el percentil 25 de 60SV que difiere un poco del 60CV, también se aprecia como los diagramas de cajas son bastante similares, lo cual indica que aparentemente, no se produce ningún cambio significativo.

Para realizar correctamente la comparativa de la resistencia entre las probetas con vidrio y sin vidrio es necesario tener en cuenta el efecto de la humedad anteriormente estudiado. Con el paso del tiempo la humedad disminuye lo que se podría traducir en un aumento de la resistencia. El punto donde se registra un menor grado de humedad es en las probetas con una edad de 120 días.

Para las probetas de 120 días sí que existe una diferenciación más importante donde las probetas con vidrio muestran una mayor resistencia a compresión que las probetas sin vidrio. Aun así, se considera que es una muestra bastante reducida para poder sacar conclusiones firmes. Se considera que sería necesario disponer de remesas de probetas con un mayor periodo de curación para poder comprobar que esta tendencia se mantiene con el paso del tiempo.

7.6. Carbonatación de cal

El aumento de la resistencia a compresión en las probetas tras un largo periodo de secado en parte se debe al proceso de carbonatación en el cual la cal hidratada reacciona con el dióxido de carbono del aire aumentando así la resistencia. Este es un proceso bastante lento, es por ello que los resultados se aprecian tras el paso de unos meses.

Esta prueba únicamente se realizó en las probetas con una edad de curado de 120 días, ya que ha sido un análisis adicional que se ha decidido realizar tras el transcurso del proyecto. Aun así, para futuras investigaciones es recomendable que se realice en todos los especímenes para poder comparar los resultados y analizar su evolución con el paso del tiempo.

La prueba de carbonatación consiste en añadir una cierta cantidad de fenolftaleína mediante goteo, el cual reacciona con la cal de la probeta tiñendo de color morado la parte de estas que aún no ha reaccionado. Esta coloración permite distinguir y estimar un porcentaje aproximado de la cantidad de tapia que ya ha reaccionado con el dióxido de carbono desde la parte externa de la probeta hacia la interna.

Esta prueba se realizó en las tongadas superior e inferior de las probetas tras el ensayo a compresión. El hecho de utilizar estas tongadas externas se debe a que se quería comprobar si la gravedad afectaba en cierta manera al proceso de reacción de la cal, así como a las condiciones de humedad en dirección longitudinal.

A continuación, en las dos siguientes imágenes se muestran 2 del total de 6 probetas que fueron sometidas al ensayo de carbonatación, siendo 3 de ellas con vidrio y 3 sin vidrio.



Figura 44. Ensayo carbonatación para la probeta SV-M3-P3-T



Figura 45. Ensayo carbonatación para la probeta CV-M1-P1-T

A continuación, en la siguiente tabla se recoge las medidas de la parte de la probeta que aún no ha reaccionado, siendo esta la zona coloreada.

Tabla 8. Medidas zona no carbonatada de las probetas de 120 días.

Muestra	Con vidrio		Sin vidrio	
	Tongada superior	Tongada inferior	Tongada superior	Tongada inferior
M1 P1 T	55,47 mm	53,39 mm	52,36 mm	55,75 mm
M2 P2 T	56,8 mm	53,46 mm	56,73 mm	58,3 mm
M3 P3 T	52,27 mm	51,51 mm	55,73 mm	54,39 mm

Si se analizan tanto las imágenes como la tabla anterior, se puede apreciar como salvo por la tongada superior de la probeta CV-M1-P1-T, en el resto de los casos la zona no carbonatada de las probetas sin vidrio es superior a las que llevan vidrio incorporado. Esta zona posee cal que todavía no ha reaccionado ya que como se ha comentado anteriormente el proceso es muy lento. Por tanto, se podría deducir que en la probeta con vidrio ha reaccionado más cal, lo que se traduce en un aumento de la resistencia a compresión tal y como se ha comprobado en la figura 42. Para poder verificar esta hipótesis sería necesario tener una población de probetas más grande y continuar con el proceso de curado para así tener en cuenta cómo evolucionan a más largo plazo.

8 CONCLUSIONES

Para finalizar con esta investigación, en los siguientes apartados se recogen las conclusiones más relevantes de este proyecto. Donde se muestra un breve resumen del alcance del proyecto, las conclusiones tanto generales como de los resultados obtenidos en los ensayos realizados y un apartado en el cual se exponen desarrollos futuros con relación a la línea de investigación seguida en este proyecto.

8.1. Resumen del alcance del proyecto

El presente trabajo fin de máster tiene como objetivo principal continuar con una línea de investigación para la mejora del conocimiento del comportamiento mecánico de la tierra como material de construcción, más concretamente la tapia. Para ello, se ha realizado un estudio de tapia con residuo de vidrio incorporado y estabilizado con cal. Para su estudio se han realizado diversos ensayos dentro de los cuales este proyecto recoge los relacionados con la inspección por ultrasonidos y la caracterización de la resistencia a compresión.

El alcance del presente proyecto se enumera en los siguientes puntos:

1. Fabricación controlada de las probetas de tapia haciendo distinción entre probetas con vidrio y sin vidrio. Para ello, se tuvo control sobre la humedad y energía de compactación aplicada durante el proceso de fabricación, mediante un compactador electromecánico.
2. Inspección por ultrasonidos en laboratorio de los especímenes de tapia.
3. Caracterización de la resistencia a compresión de los especímenes de tapia.
4. Análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de ultrasonidos y resistencia a compresión.
5. Conclusiones obtenidas del análisis de resultados.

Para la realización tanto del proceso de fabricación como los ensayos se contó con las instalaciones y ayuda del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructura.

8.2. Conclusiones sobre los resultados de los ensayos

En este apartado se han recogido todas las conclusiones que se han obtenido durante todo el proceso donde se incluye la fabricación de las probetas y los ensayos de las mismas. A continuación, se muestran unas conclusiones generales que engloban todo el proceso.

- La geometría de las probetas utilizada en este proyecto tiene aspectos tanto positivos como negativos que se han de tener en consideración para futuras investigaciones. Su geometría y tamaño favorecen su manejabilidad lo cual ayuda al desarrollo de los ensayos facilitando tanto su traslado como su manipulación. Sin embargo, la forma prismática de las probetas facilitaba el desprendimiento de material a través de las aristas.
- A pesar de que tras el análisis de los resultados tanto las probetas con vidrio y sin vidrio son muy similares, de manera visual sí que se aprecia gran diferencia. Una hipótesis es que esta diferencia en la apariencia se deba a la modificación del proceso de adición de componentes a la mezcladora durante el proceso de fabricación.
- Un aspecto a considerar del proceso de fabricación es la compactación ya que se esta se realizó de manera manual. Para aplicar la misma energía de compactación a todas las probetas se utilizó un cronómetro para controlar el tiempo de compactación y un martillo percutor el cual se debía ir desplazando por toda la superficie de la tongada de cada probeta. No obstante, existe la posibilidad de que surjan mayores errores humanos que puedan influenciar de manera indirecta en los resultados.
- Cabe destacar que a la primera remesa de probetas; de 30 días, no se le realizó la operación de refrentado por lo que la comparativa con el resto de las probetas en el aspecto de resistencia a compresión no es del todo correcta. Este efecto de refrentado no se puede obviar ya que se considera que tuvo un efecto directo en los ensayos de compresión debido a que las cargas aplicadas en las probetas refrentadas se reparten de manera mucho más homogénea por la superficie de contacto. Por tanto, es muy recomendable realizar el refrentado a todas las probetas desde un inicio.
- Tras finalizar los ensayos de compresión, se observó que al manipular las probetas estando ya fisuradas por el ensayo, se rompía por la sección de la tongada lo cual da a entender que esta unión entre tongadas carece de la cohesión que posee la probeta en el interior de cada tongada.
- En algunos estudios realizados en este proyecto tras el análisis de resultados, se ha considerado que las muestras con las que se contaba eran escasas. Por tanto, se recomienda que para futuras investigaciones se cuenten con mayores muestras e incluso que el proceso de curado se alargue en el tiempo pudiendo así definir el comportamiento de las probetas tras 120 días de secado.
- Un aspecto que se ha de tener en consideración son las fechas en las que ha tenido lugar esta investigación. El ensayo de las probetas tuvo comienzo en Abril cuya temperatura media en la ciudad de Sevilla rondó los 18°C, y finalizó en Julio con una temperatura media de 29°C. Esta diferencia de temperatura afecta de manera indirecta a la evolución de la humedad en las probetas y por consiguiente en la resistencia.

Al analizar los resultados obtenidos de los ensayos de ultrasonidos donde se han estudiado diferentes parámetros tales como los gradientes de compactación por probeta, influencia de la edad y una comparativa entre ambas tipologías de probetas, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

- El estudio de gradientes ha permitido ratificar la importancia que tiene el proceso de fabricación en esta investigación ya que se puede apreciar como los resultados obtenidos se encuentran directamente condicionados por este proceso. Este efecto se aprecia especialmente en los puntos donde se produce el cambio de tongada donde se comprueba una variación en la velocidad de propagación respecto al resto de puntos de su misma tongada. Se considera que este efecto se debe a que en estos puntos donde se encuentran ambas superficies la cohesión de los materiales no posee la homogeneización deseada. Además, esta característica se puede apreciar a simple vista donde se puede observar las diferentes capas del material.

- Un aspecto que se ha resaltado en los resultados es el grado de anisotropía. En la mayoría de los resultados existe una diferencia considerable entre la velocidad de propagación vertical y horizontal, siendo esta última la que posee una mayor velocidad de propagación de onda.
- En cuanto a la influencia de la edad, no se ha detectado ninguna tendencia que se repita en todos los puntos de medida. Esto implica que el efecto del paso del tiempo en la velocidad de propagación de una onda puede estar directamente relacionado con la heterogeneidad de la probeta. Por lo tanto, una mayor heterogeneidad en el proceso de fabricación conlleva a una mayor heterogeneidad en el proceso de curado.
- El periodo de tiempo en el que se ha detectado un mayor incremento de la velocidad de propagación de onda es en el inicial. Este efecto se debe a que este periodo inicial es en el que se producen más cambios en la probeta debido a las reacciones químicas que están teniendo lugar como la carbonatación o la pérdida de humedad por el proceso de secado al aire libre.
- Existe una clara diferencia de porosidad superficial entre las probetas con vidrio y sin vidrio. A pesar de que este efecto no afecte tanto al ensayo de porosidad; ya que se analiza la parte central de la tongada intermedia, si afecta directamente al ensayo de ultrasonidos. Esta porosidad esta asociada al proceso de fabricación. El hecho de encontrar poros en el trayecto del sonido afecta a la velocidad de propagación de onda viéndose reducida. Para disminuir este efecto, es recomendable el uso de gel para el palpador ya que permite reducir el efecto de estos defectos superficiales.

Al analizar los resultados obtenidos de los ensayos de compresión donde se han estudiado diferentes parámetros tales como la influencia de la posición en el molde durante el proceso de fabricación, influencia de la edad en la resistencia a compresión, evolución de la humedad con respecto al paso del tiempo, evolución de la resistencia a compresión con respecto a la humedad y una comparativa entre ambas tipologías de probetas, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

- En cuanto a la influencia de la posición en el molde durante el proceso de fabricación, se puede apreciar claramente que para el grupo de probetas de 30 días las cuales no se le realizó un refrentado, las probetas de la parte inferior del molde poseen una mayor resistencia. Una posible explicación se basa en que las probetas de la parte inferior poseen un mayor paralelismo entre la cara superior e inferior haciendo que la carga se distribuya de manera más homogénea a la hora de realizar el ensayo. Este efecto disminuye en el resto de las remesas de probetas en las que sí se realizó la operación de refrentado.
- A pesar de considerar que no se dispone de suficientes muestras para tal afirmación, se podría llegar a deducir que la influencia de la edad tiene un mayor peso en las probetas con vidrio, ya que es donde se aprecian mayores cambios con el paso del tiempo.
- Con respecto a la evolución de la humedad con el paso del tiempo, se puede concluir que el tramo en el que se detecta una mayor variación en la humedad es el final. También se ha de tener en cuenta las fechas en las que se ha llevado a cabo este proyecto ya que este tramo final coincide con el periodo de tiempo en el que más calor hizo durante toda la experimentación.
- Al analizar el grado de humedad de las probetas, se observa que las probetas sin vidrio, por norma general, poseen mayor humedad que las probetas con vidrio. Esto sucede para todas las fechas estudiadas. Es posible que esto se deba a su composición ya que aquellas que no poseen vidrio son capaces de absorber una mayor cantidad de agua debido a que poseen una mayor cantidad de arena.
- En función de los valores de humedad y resistencia obtenidos, existe una hipótesis que determina que, a mayor humedad, menor resistencia. Cabe destacar que existen más factores que afectan directamente a la resistencia de la probeta, por lo que esta hipótesis hay que tratarla con cautela.
- Si se analiza la resistencia a compresión de las probetas de 30, 60 y 90 días los resultados obtenidos son muy similares, lo que indica que aparentemente no hubo ningún cambio significativo. En cambio, para las probetas de 120 días si que existe una diferenciación más importante donde las probetas con vidrio muestran una mayor resistencia a compresión que las probetas sin vidrio. Aun así, se considera que es una muestra bastante reducida para poder sacar conclusiones firmes. Se considera que sería necesario disponer de remesas de probetas con un mayor periodo de curación para poder comprobar que esta tendencia se mantiene con el paso del tiempo.

8.3. Desarrollos futuros

El presente trabajo fin de máster se plantean una serie de recomendaciones y sugerencias para el desarrollo de futuros trabajos e investigaciones relacionados con el conocimiento del comportamiento mecánico de la tapia con residuo de vidrio incorporado y estabilizado con cal.

- Según los resultados obtenidos en los ensayos de compresión, se recomienda a futuro el análisis de probetas con una mayor edad de secado que 120 días. En el último periodo de secado se aprecia un cambio en la resistencia de las probetas, especialmente en las probetas con vidrio, pero se desconoce su evolución con el paso del tiempo a partir de dicha fecha.
- También es recomendable que se analicen un mayor número de probetas por ensayo y fecha para así poder sacar conclusiones más concluyentes sobre los resultados obtenidos.
- Debido al proceso de fabricación utilizado, no se puede garantizar una geometría completamente prismática. Por ello, es muy recomendable realizar la operación de refrentado en todas las probetas que se vayan a ensayar para así poder garantizar que en cada espécimen la carga se reparte homogéneamente por la superficie de contacto.
- En el presente proyecto únicamente se realizó la prueba de carbonatación para los especímenes de 120 días. Es recomendable que en futuras investigaciones esta prueba se realice en todas las probetas para así poder estudiar la evolución de la carbonatación con el paso del tiempo y su influencia en el comportamiento mecánico.
- Es objeto de interés poder estudiar el comportamiento mecánico de especímenes con diferentes proporciones de vidrio, distinta geometría o incluso pequeñas construcciones de este material que permita realizar la comparativa con las probetas prismáticas ensayadas en este proyecto.
- Un desarrollo futuro que puede ser interesante es el estudio de diferentes parámetros relacionados con las propiedades mecánicas tales como la fatiga, dureza, tenacidad, resistencia a flexión... etc.
- Un estudio muy interesante a realizar es el análisis del impacto en el medio ambiente que puede tener el hecho de incorporar residuos de vidrio como material de construcción.

9 REFERENCIAS

- [1] FRANCISCO JOSÉ SANCHIS MULLOR, *La arquitectura de tierra. Evolución a través de la historia*, Tesis de Máster, Universitat Politècnica de Valencia, 2009
- [2] S. BESTRATEN, E. HORMÍAS, A. ALTEMIR, *Construcciones con tierra en el siglo XXI*, Universitat Politècnica de Catalunya (2011), Vol. 63, 523, 5-20, ISSN 0020-0883.
- [3] BAULUZ DEL RÍO, G. y BÁRCENA BARRIOS, P., 1992. *Bases para el diseño y construcción con tapial*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Madrid. ISBN 84-7433-839-5
- [4] F. JAVIER CASTILLA PASCUAL, *La recuperación de la tierra como material de construcción: tradición e innovación*, Investigación y Transferencia en la Escuela Politécnica de Cuenca. 2015, ISBN 978-84-608-1482-5
- [5] AA. VV, *La restauración de la tapia en la Península Ibérica. Criterios, técnicas, resultados y perspectivas*, 2014 Argumentum | TC Cuadernos, ISBN 978-972-8479-83-1
- [6] L. F. GUERRERO BACA. *Pasado y provenir de la arquitectura de tapia*. Bitácora Arquitectura, (22), 6-13
- [7] MILETO, C. y VEGAS, F., 2014. *La restauración de la tapia en la Península Ibérica: criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. Valencia. ISBN 978-84-942233-3-4
- [8] BAULUZ DEL RÍO, G. y BÁRCENA BARRIOS, P., 1992. *Bases para el diseño y construcción con tapial*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Madrid. ISBN 84-7433-839-5
- [9] GALLARDO NAVARRO, M. A., *Comportamiento a compresión de tapia con residuo de vidrio incorporado y estabilizadas con cal*. Trabajo Fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla 2022.
- [10] UNE-EN-14580, *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad estático*. 2005.
- [11] UNE-EN 12504-4, *Ensayos de hormigón en estructuras*. 2006.
- [12] UNE 103-500-94, *Ensayo de Compactación. Proctor Normal*. 1994
- [13] UNE 103-300, *Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa*. 1993
- [14] UNE 7050-2, *Tamices y tamizado de ensayo*. 1997
- [15] IOANNA PAPAYIANNI, VASILIKI PACHTA, *Earth block houses of historic centers. A sustainable upgrading with compatible repair materials*. Procedia Environmental Sciences. Volume 38, 2017, Pages 274-282.
- [16] AA. VV. *Earth construction: Field variabilities and laboratory reproducibility*. *Construction and Building Materials*. Volume 314, Part B, January 2022, 125591

- [17] AA. VV. *The potential use of crushed waste glass as a sustainable alternative to natural and manufactured sand in geotechnical applications*. Journal of Cleaner Production, Volume 284, 2021, 124762
- [18] SHANTANU PAUL, MOHAMMAD SHARIFUL ISLAM, TAUSIF E. ELAHI, *Comparative effectiveness of fibers in enhancing engineering properties of Earth as a building material: A review*. Construction and Building Materials, Volume 332, 2022, 127366
- [19] MATTHEW R. HALL, RICK LINDSAY, MEROR KRAYENHOFF, *Modern Earth Buildings Material, Engineering, Constructions and Applications Woodhead Publishing Series in Energy*, 2012, ISBN 978-0-85709-026-3
- [20] F. PACHECO-TORGAL, P.B. LOURENGO, J.A. LABRINCHA, S. KUMAR, P. CHINDAPRASIRT, *Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks*, 2015, ISBN 978-1-78242-305-8
- [21] JOSÉ DANIEL RODRIGUEZ MARISCAL, JACINTO CANIVELL, MARIO SOLÍS, *Evaluating the performance of Sonic and ultrasonic test for the inspection of rammed earth construction*, 2021, Volume 299