

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Comportamiento a compresión de tapia con residuo
de vidrio incorporado y estabilizadas con cal

Autor: Manuel Antonio Gallardo Navarro

Tutores: Mario Solís Muñiz, José Daniel Rodríguez Mariscal

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

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Comportamiento a compresión de tapia con residuo de vidrio incorporado y estabilizadas con cal

Autor:

Manuel Antonio Gallardo Navarro

Tutores:

Mario Solís Muñiz

Profesor Titular

José Daniel Rodríguez Mariscal

Profesor Sustituto Interino

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado: Comportamiento a compresión de tapia con residuo de vidrio incorporado y estabilizadas con cal

Autor: Manuel Antonio Gallardo Navarro

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:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Con este apartado pongo fin a estos años de carrera donde me he formado para ejercer la profesión de ingeniero, aquello que siempre he soñado. Ha sido un camino con momentos difíciles y otros increíblemente buenos, pero el haber llegado hasta final no solo ha sido fruto de mi esfuerzo.

En primer lugar, agradecer a mis padres su cariño, confianza y apoyo porque ellos me han guiado desde pequeño a luchar siempre por lo que quiero y a los que estoy infinitamente agradecido por todo lo que han hecho por mí. Todo lo que soy es gracias a ellos.

A mi hermana, no podría ser más afortunado de haber crecido a tu lado, por su alegría y positividad contagiosa en todo momento y para la que siempre estaré ahí.

A mi pareja, mi acompañante y guía durante todos estos años a la que agradezco su paciencia, consejos y apoyo incondicional en todo momento. Gracias por todo lo vivido y por lo que nos queda por vivir, lo mejor siempre está por llegar.

Finalmente, acordarme de todos aquellos profesores que han compartido sus conocimientos y experiencia durante este camino. Especialmente a Mario Solís Muñoz y José Daniel Rodríguez Mariscal por su cercanía, disponibilidad y ayuda en todo momento, los cuales me han brindado la oportunidad de realizar este trabajo y colaborar con ellos mostrándome una posible y apasionante función de la ingeniería en la sociedad. También a mi compañero de proyecto Joseba García Román por su dedicación y capacidad de trabajo. Agradecer al departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la ETS de Ingeniería de Edificación de Sevilla su colaboración en la realización de este proyecto.

Manuel Antonio Gallardo Navarro

Sevilla, 2022

Resumen

La tapia es una antigua técnica constructiva basada en el uso de tierra compactada con un cierto grado de humedad relleno un encofrado tradicionalmente de madera. Esta técnica ha sido empleada para la construcción de todo tipo de edificios y ejecutada por distintas civilizaciones, las cuales han aportado a su desarrollo y preservación. Todo ello asociado al instinto de supervivencia y al hecho de pertenecer a un hogar mediante uno de los elementos más básicos y disponibles como es la tierra.

Este material presenta múltiples ventajas entre las que destacan su gran disponibilidad y una fácil manipulación de tal forma que no se requiere una mano de obra altamente cualificada. Con la llegada de la industrialización materiales como el hormigón y el acero, dejaron a las construcciones con tierra en un segundo plano. La sociedad actual se enfrenta a un problema común como es la preservación del medio ambiente para la cual no contribuye la extracción, refinamiento y gasto de energía para la obtención de muchos de los materiales destinados a la industria de la construcción. Ante esta situación, la construcción con tierra y, en concreto la técnica de la tapia, podría suponer una solución más que viable para la cual se está desarrollando una normativa reguladora.

El proyecto presentado pertenece a una línea de investigación ya iniciada por el departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la ETSI de Sevilla, el cual contribuye a la elaboración de esta normativa y persigue la reutilización de otros materiales para poderlos incluir en la construcción con tapia.

En este caso se añadió a la tapia cal y vidrio reciclado con el objetivo de comprobar si estos contribuían en la mejora de las prestaciones mecánicas ya conocidas de la tapia. Para ello se llevaron a cabo una campaña experimental basada en la realización de dos ensayos: ensayo de ultrasonidos y ensayo mecánico a compresión, siendo este último el que se aborda en mayor profundidad en este proyecto. Para estos ensayos se elaborarán dos tandas de probetas con cal, pero solo a una de ellas se le añadirá el vidrio reciclado. Con esto se busca comparar resultados como la resistencia a compresión simple, la ley de comportamiento o el análisis del efecto de la edad.

Abstract

Rammed earth is an ancient construction technique based on the use of compacted earth with a certain degree of moisture filling a traditionally wooden framework. This technique has been used for the construction of all kinds of buildings and executed by different civilizations which have contributed to its development and preservation. All this associated with the survival instinct and the fact of belonging to a home through one of the most basic and available elements such as earth.

This material has many advantages as its great availability and easy handling, so that a highly qualified workforce is not required. With the arrival of industrialization, earth constructions came second in comparison with materials such as concrete and steel. Current society face a common issue such as the preservation of the environment for which the extraction, refinement and expenditure of energy to obtain many of the materials destined for the construction industry do not contribute. Faced with this situation, earth constructions and specifically rammed earth, could be a viable solution for which regulatory regulations are being developed.

The project presented belongs to a line of research already initiated by the department of Continuum Mechanics and Structures Theory of ETSI from Seville, which contributes to the elaboration of this regulation and pursues the reuse of other materials to be able to be included in rammed earth constructions.

In this case, lime and recycled glass were added to rammed earth with the aim of verifying if these materials contributed to the improvement of the already known mechanical output of rammed earth. An experimental campaign was carried out based on the performance of two different tests: ultrasound test and mechanical compression test, being the second one that is analysed in greater depth in this project. For these test, two batches of test tubes will be made with lime, but recycled glass will be added to only one of them. With this, it is sought to compare results such as the single compressive strength, stress-strain curves or the analysis of the effect of age.

Índice

Agradecimientos	i
Resumen	i
Abstract	i
Índice	ii
Índice de Tablas	iv
Índice de Figuras	vi
1 Introducción	11
1.1. <i>Uso de la tierra como material de construcción</i>	13
1.1.1 Adobe	13
1.1.2 Tapia	14
1.2. <i>Interés de la tierra como material de construcción</i>	15
1.3. <i>Desarrollo de la tapia en España</i>	16
1.3.1. El desarrollo de la técnica del tapial	17
1.3.2. Construcciones actuales con tapia y motivación del proyecto	18
1.4. <i>Objetivos del proyecto</i>	19
1.5. <i>Cronograma del proyecto</i>	20
2 Propiedades del material	21
2.1 <i>Granulometría</i>	22
2.1.1 Granulometría vidrio	24
2.2 <i>Ensayo Próctor Normal</i>	28
3 Procedimiento de fabricación de las probetas	32
3.1 <i>Descripción del molde</i>	32
3.2 <i>Tipología de las probetas</i>	34
3.3 <i>Procedimiento de fabricación de las probetas</i>	35
3.3.1 Mezclado de componentes	35
3.3.2 Humedad de fabricación	37
3.3.3 Procedimiento de compactación	39
3.3.4 Secado	41
3.4 <i>Densidad y porosidad</i>	43
4 Ensayos experimentales	46
4.1 <i>Normativa de referencia</i>	47
4.2 <i>Equipamiento ensayos</i>	48
4.2.1 Ensayo de ultrasonidos	48
4.2.2 Ensayo a compresión simple	49
4.3 <i>Configuración y preparación de los ensayos</i>	52
4.3.1 Ensayo de ultrasonidos	52
4.3.2 Ensayo a compresión simple	55
5 Resultados y análisis del ensayo mecánico	59
5.1 <i>Resistencia a compresión simple</i>	60

Comportamiento a compresión de tapia con residuo de vidrio incorporado y estabilizadas con cal	iii
5.1.1 Probetas 30 días	60
5.1.2 Probetas 60 días	62
5.1.3 Probetas 90 días	64
5.1.4 Probetas 120 días	66
5.2 <i>Curvas tensión-deformación</i>	68
5.2.1 Tratamiento de datos y obtención de resultados	68
5.2.2 Representación de gráficas	69
5.3 <i>Tipo de rotura en las probetas</i>	85
5.3.1 Probetas 30 días	85
5.3.2 Probetas 60 días	87
5.3.3 Probetas 90 días	88
5.3.4 Probetas 120 días	89
5.4 <i>Análisis efecto edad</i>	90
5.4.1 Condiciones de humedad y temperatura	90
5.4.2 Carbonatación de la cal	91
6 Conclusiones y trabajos futuros	93
6.1 <i>Resumen del alcance del proyecto</i>	93
6.2 <i>Conclusiones sobre resultados de los ensayos</i>	94
6.3 <i>Desarrollos futuros</i>	96
Anexo A	98
Anexo B	100
Anexo C	105
Anexo D	110
Anexo E	119
Referencias	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Cronograma del proyecto	20
Tabla 2.1. Clasificación de partículas según su tamaño	21
Tabla 2.2. Porcentajes componentes tapia, MOPT y CRATerre	22
Tabla 2.3. Porcentajes componentes tapia, CRATerre	22
Tabla 2.4. Porcentajes componentes tapia, Prescripciones del Instituto Eduardo Torroja	23
Tabla 2.5. Porcentajes planteados para la mezcla del proyecto	23
Tabla 2.6. Porcentajes mezcla probetas sin vidrio	23
Tabla 2.7. Granulometría inicial vidrio	25
Tabla 2.8. Granulometría mezcla 50% A y 50% B	26
Tabla 2.9. Granulometría mezcla 35% A y 65% B	27
Tabla 2.10. Porcentajes mezcla probetas con vidrio	28
Tabla 2.11. Medidas densidad seca, Ensayo Próctor Normal	29
Tabla 2.12. Medidas humedad, Ensayo Próctor Normal	30
Tabla 3.1. Probetas con/sin vidrio	34
Tabla 3.2. Pesos materiales añadidos 100 kg mezcla sin vidrio	36
Tabla 3.3. Pesos materiales añadidos para 50 kg de mezcla	36
Tabla 3.4. Medida humedad mezcla seca sin vidrio	38
Tabla 3.5. Medida humedad mezcla fabricación con vidrio	39
Tabla 3.6. Medida humedad mezcla fabricación sin vidrio	39
Tabla 3.7. Fechas establecidas ensayos	42
Tabla 4.1. Fechas establecidas ensayos	46
Tabla 5.1. Número de probetas ensayadas a compresión para cada fecha de ensayo	59
Tabla 5.2. Resistencia característica y desviación típica, probetas 30 días	62
Tabla 5.3. Resistencia característica y desviación típica, probetas 60 días	64
Tabla 5.4. Resistencia característica y desviación típica, probetas 90 días	66
Tabla 5.5. Resistencia característica y desviación típica, probetas 120 días	67
Tabla 5.6. Medidas zona no carbonatada en probetas de 120 días	92
Tabla 7.1. Densidad aparente y porosidad probetas con vidrio 90 días	99
Tabla 7.2. Densidad aparente y porosidad probetas sin vidrio 90 días	99
Tabla 8.1. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 30 días con vidrio	101
Tabla 8.2. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 30 días con vidrio	101
Tabla 8.3. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 60 días con vidrio	102

Tabla 8.4. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 60 días sin vidrio	102
Tabla 8.5. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 90 días con vidrio	103
Tabla 8.6. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 90 días sin vidrio	103
Tabla 8.7. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 120 días con vidrio	104
Tabla 8.8. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 120 días sin vidrio	104
Tabla 9.1. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 120 días sin vidrio	106
Tabla 10.1. Curvas tensión-deformación cámara 1, probetas 30 días con vidrio	111
Tabla 10.2. Curvas tensión deformación cámara 1, probetas 30 días sin vidrio	111
Tabla 10.3. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 30 días sin vidrio	112
Tabla 10.4. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 30 días sin vidrio	112
Tabla 10.5. Curvas tensión deformación cámara 1, probetas 60 días sin vidrio	113
Tabla 10.6. Curvas tensión deformación cámara 1, probetas 60 días sin vidrio	113
Tabla 10.7. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 60 días con vidrio	114
Tabla 10.8. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 60 días sin vidrio	114
Tabla 10.9. Curvas tensión deformación cámara 1, probetas 90 días con vidrio	115
Tabla 10.10. Curvas tensión deformación cámara 1, probetas 90 días sin vidrio	115
Tabla 10.11. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 90 días con vidrio	116
Tabla 10.12. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 90 días sin vidrio	116
Tabla 10.13. Curvas tensión deformación cámara 1, probetas 120 días con vidrio	117
Tabla 10.14. Curvas tensión deformación cámara 1, probetas 120 días sin vidrio	117
Tabla 10.15. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 120 días con vidrio	118
Tabla 10.16. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 120 días sin vidrio	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Gran Pirámide del Sol de Teotihuacan, México	11
Figura 1.2. Ciudadela de Arge Bam, Irán	12
Figura 1.3. Clasificación de las Técnicas de Construcción con Tierra	13
Figura 1.4. Bloques de adobe	14
Figura 1.5. Castillo de Biar, Alicante	14
Figura 1.6. Áreas de construcción con tierra y lugares que son Patrimonio de la Humanidad	15
Figura 1.7. Castillo de Alcalá de Guadaira, Sevilla	16
Figura 1.8. Tapial tradicional de la comarca de Els Ports, Castellón	17
Figura 1.9. Representación tapial tradicional y contemporáneo	17
Figura 1.10. Biblioteca Valverde de Burguillos, Badajoz	18
Figura 1.11. Piscina municipal de Toro, Zamora	19
Figura 2.1. Vidrio medio sin triturar	24
Figura 2.2. Vidrio grueso sin triturar	24
Figura 2.3. Sustitución Arena-Vidrio al 50% y tipos de vidrios empleados	25
Figura 2.4. Granulometría mezcla 50% A y 50% B	26
Figura 2.5. Sustitución Arena-Vidrio al 75% y tipos de vidrios empleados	26
Figura 2.6. Granulometría mezcla 35% A y 65% B	27
Figura 2.7. Molde con muestra compactada, Ensayo Próctor Normal	28
Figura 2.8. Muestra compactada y desmoldada, Ensayo Próctor Normal	29
Figura 2.9. Gráfica Ensayo Próctor Normal	31
Figura 3.1. Molde fabricación probetas	32
Figura 3.2. Representación ejes y numeración de probetas, esquema planta del molde	33
Figura 3.3. Representación 2D y 3D modelo probeta	34
Figura 3.4. Procedimiento de fabricación	35
Figura 3.5. Arcilla, limo, arena y grava empleados en la mezcla, Laboratorios ETSI	35
Figura 3.6. Medición humedad con sartén	37
Figura 3.7. Identificación columnas compactación probetas	40
Figura 3.8. Probetas compactadas en el molde	41
Figura 3.9. Probetas columna con vidrio (izquierda) y sin vidrio (derecha)	41
Figura 3.10. Descripción códigos probetas	42
Figura 3.11. Secado probetas con vidrio	43

Figura 3.12. Secado probetas sin vidrio	43
Figura 3.13. Densidad aparente probetas CV 90 días	44
Figura 3.14. Densidad aparente probetas SV 90 días	44
Figura 3.15. Porosidad probetas CV 90 días	45
Figura 3.16. Porosidad probetas SV 90 días	45
Figura 4.1. Equipo ensayo ultrasonidos	48
Figura 4.2. Máquina hidráulica ensayo a compresión	49
Figura 4.3. Extensómetro, ensayo a compresión simple	50
Figura 4.4. Sistema de videextensometría, ensayo a compresión simple	51
Figura 4.5. Sistema de videoextensometría y extensómetro, ensayo a compresión simple	51
Figura 4.6. Planos y caras probeta, representación 3D	52
Figura 4.7. Esquema actuación ensayo ultrasonidos	53
Figura 4.8. Diagrama de flujo procedimiento ensayo de ultrasonidos	54
Figura 4.9. Patrón tarado en 5 mm sobre pletina metálica	55
Figura 4.10. Calibración sistema vídeo extensometría	56
Figura 4.11. Gráfica X(tiempo, s)-Y(tensión, MPa) ciclos de carga, Ensayo a compresión simple	56
Figura 4.12. Probeta 30 días sin refrentar, Ensayo a compresión simple	57
Figura 4.13. Probetas 90 días refrentadas, Proceso de refrentado	58
Figura 5.1. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 30 días con vidrio	60
Figura 5.2. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 30 días sin vidrio	61
Figura 5.3. Gráfica resistencia a compresión probetas 30 días con vidrio/sin vidrio	61
Figura 5.4. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 60 días con vidrio	62
Figura 5.5. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 60 días sin vidrio	63
Figura 5.6. Gráfica resistencia a compresión probetas 60 días con vidrio-sin vidrio	63
Figura 5.7. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 90 días con vidrio	64
Figura 5.8. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 90 días sin vidrio	65
Figura 5.9. Gráfica resistencia a compresión probetas 90 días con vidrio-sin vidrio	65
Figura 5.10. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 120 días con vidrio	66
Figura 5.11. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 120 días sin vidrio	66
Figura 5.12. Gráfica resistencia a compresión probetas 120 días con vidrio-sin vidrio	67
Figura 5.13. Gráfica resistencia a compresión-edad de ensayo, probetas con y sin vidrio	68
Figura 5.14. Clasificación gráficas tensión-deformación	69
Figura 5.15. Gráfica tensión-deformación 30 días – con vidrio	70
Figura 5.16. Gráfica tensión-deformación 30 días – con vidrio: media y desviación típica	70
Figura 5.17. Gráfica tensión-deformación 30 días – con vidrio: media, máximo y mínimo	71
Figura 5.18. Gráfica tensión-deformación 30 días – sin vidrio	71
Figura 5.19. Gráfica tensión-deformación 30 días – sin vidrio: media y desviación típica	72
Figura 5.20. Gráfica tensión-deformación 30 días – sin vidrio: media, máximo y mínimo	72

Figura 5.21. Gráfica tensión-deformación 60 días – con vidrio	73
Figura 5.22. Gráfica tensión-deformación 60 días – con vidrio: media y desviación típica	73
Figura 5.23. Gráfica tensión-deformación 60 días – con vidrio: media, máximo y mínimo	74
Figura 5.24. Gráfica tensión-deformación 60 días – sin vidrio	74
Figura 5.25. Gráfica tensión-deformación 60 días – sin vidrio: media y desviación típica	75
Figura 5.26. Gráfica tensión-deformación 60 días – sin vidrio: media, máximo y mínimo	75
Figura 5.27. Gráfica tensión-deformación 90 días – con vidrio	76
Figura 5.28. Gráfica tensión-deformación 90 días – con vidrio: media y desviación típica	76
Figura 5.29. Gráfica tensión-deformación 90 días – con vidrio: media, máximo y mínimo	77
Figura 5.30. Gráfica tensión-deformación 90 días – sin vidrio	77
Figura 5.31. Gráfica tensión-deformación 90 días – sin vidrio: media y desviación típica	78
Figura 5.32. Gráfica tensión-deformación 90 días – sin vidrio: media, máximo y mínimo	78
Figura 5.33. Gráfica tensión-deformación 120 días – con vidrio	79
Figura 5.34. Gráfica tensión-deformación 120 días – con vidrio: media y desviación típica	79
Figura 5.35. Gráfica tensión-deformación 120 días – con vidrio: media, máximo y mínimo	80
Figura 5.36. Gráfica tensión-deformación 120 días – sin vidrio	80
Figura 5.37. Gráfica tensión-deformación 120 días – sin vidrio: media y desviación típica	81
Figura 5.38. Gráfica tensión-deformación 120 días – sin vidrio: media, máximo y mínimo	81
Figura 5.39. Gráfica tensión-deformación con vidrio a todas las edades de secado	82
Figura 5.40. Gráfica tensión-deformación y desv. típica con vidrio a todas las edades de secado	82
Figura 5.41. Gráfica tensión-deformación sin vidrio a todas las edades de secado	83
Figura 5.42. Gráfica tensión-deformación y desv. típica sin vidrio a todas las edades de secado	83
Figura 5.43. Gráfica tensión-deformación con/sin vidrio a todas las edades de secado	84
Figura 5.44. Probeta 30-CV-M4-P1-T antes/después ensayo a compresión	85
Figura 5.45. Probeta 30-CV-M3-P4-T antes/después ensayo a compresión	85
Figura 5.46. Probeta 30-SV-M3-P4-T antes/después ensayo a compresión	86
Figura 5.47. Probeta 60-CV-M1-P3-T antes/después ensayo a compresión	87
Figura 5.48. Probeta 60-SV-M4-P1-B después ensayo a compresión	87
Figura 5.49. Probeta 90-CV-M4-P2-B antes/después ensayo a compresión	88
Figura 5.50. Probeta 90-SV-M1-P4-T antes/después ensayo a compresión	88
Figura 5.51. Probeta 120-CV-M2-P2-T antes/después ensayo a compresión	89
Figura 5.52. Probeta 120-SV-M1-P1-T antes/después ensayo a compresión	89
Figura 5.53. Prueba de carbonatación, probeta CV-120-M1-P1-T	91
Figura 5.54. Prueba de carbonatación, probeta SV-120-M3-P3-T	92
Figura 11.1. Humedad y temperatura durante el proceso de secado	120

1 INTRODUCCIÓN

La evolución del ser humano desde el nomadismo al sedentarismo en la etapa conocida como el Mesolítico llevó a que se alcanzase una nueva realidad donde la tierra, el ser humano y la arquitectura estaban entrelazados. Con el comienzo de la vida nómada, hicieron su aparición los primeros refugios contruidos con el material más simple y con mayor disponibilidad que tenía el ser humano, la tierra.

El comienzo de la arquitectura con tierra es una necesidad adherida al origen de las primeras civilizaciones en la historia de la humanidad hace más de 10000 años en Mesopotamia. De esta primera civilización se destacan algunas construcciones con tierra cruda como la Torre de Babel, la cual se considera el primer rascacielos de la historia.

Las construcciones con tierra perduraron y evolucionaron a lo largo de los siglos debido a su resistencia y solidez. A partir del siglo V antes de la era cristiana, se decidió emplear la tierra como material de construcción en La Gran Muralla China junto con la piedra como material de revestimiento. A su vez, las culturas amerindias emplearon también la tierra como material de construcción de viviendas y grandes conjuntos arquitectónicos como la gran pirámide del Sol de Teotihuacan (México), construida entre los siglos I y III, donde se utilizaron más de un millón de metros cúbicos de tierra para formar su núcleo (Figura 1.1).^[1]



Figura 1.1. Gran Pirámide del Sol de Teotihuacan, México

Todas las grandes civilizaciones de la historia usaron la tierra. Las ruinas y restos arqueológicos de los persas, asirios, egipcios, babilonios, griegos y romanos nos muestran como estos pueblos usaban la tierra para cualquier tipo de edificio, desde sus propias casas a los palacios más majestuosos. Por lo tanto, el empleo de este material en la construcción se convirtió en un elemento transversal y común entre las grandes civilizaciones de la historia del ser humano, las cuales cada una tenía sus propios dioses, culturas y tipología de vida, pero un mismo instinto de supervivencia basado en la pertenencia a un hogar.^[2]

En la actualidad, en torno a un tercio de la humanidad vive en casas de tierra. Este material es todavía predominante en aquellas regiones donde las necesidades de viviendas son más acusadas como África, Oriente Medio y América Latina (Figura 1.2). De la misma manera, la tierra es un material de construcción fundamental en China y en la India, donde hay más de 50 millones de casas construidas con este elemento. Como se ha podido comprobar, la construcción con tierra se encuentra más arraigada en el llamado Tercer Mundo. Esto se debe principalmente a que es un recurso barato, abundante y sólo requiere una asignación mínima de mano de obra cualificada al igual que de maquinaria y medios auxiliares.



Figura 1.2. Ciudadela de Arge Bam, Irán

Desde un punto de vista más local, en España, no existe una normativa técnica reguladora que permita la construcción con tierra lo que supone un obstáculo administrativo y legal. En la actualidad, se ha avanzado en ese aspecto de tal forma que ya se ha publicado una norma que posibilita la construcción con Bloques de Tierra Comprimida (BTC), y está en elaboración otra sobre el tapial.^[1]

La construcción con tierra abre una alternativa y posible solución a los graves problemas medioambientales de la actualidad derivados del mundo industrializado actual. A parte de su abundancia, disponibilidad y viabilidad económica presenta otras características reseñables como su reutilización, disminución de la contaminación ambiental, aislante térmico, acústico e incluso su resistencia al fuego.

Aunque son numerosas las ventajas que presenta hay que destacar algunas desventajas que limitan las construcciones con tierra. En comparación con materiales industrializados como el hormigón, la tierra no es un material de construcción estandarizado, se contrae al secarse (puede originar la aparición de grietas) y no es impermeable por lo que es realmente sensible a agentes externos como la erosión por viento o agua.^[1,3]

1.1. Uso de la tierra como material de construcción

Este elemento ofrece distintas posibilidades constructivas, las cuales se clasifican en diversos métodos de construcción. Cada método se adapta a la calidad de la tierra empleada y, refleja a su vez, la identidad y cultura de las personas que han desarrollado cada uno de ellos pudiendo distinguirse incluso cientos de variantes en función de la región.

En la actualidad, se distinguen doce métodos claramente diferenciados que se pueden clasificar en tres grandes grupos de sistemas constructivos según el uso de la tierra cruda: forma monolítica y portante, albañilería portante y relleno de una estructura o armazón de apoyo hecho de otro material. Estas doce técnicas de construcción vienen determinadas por el grado de plasticidad de la tierra empleada entre los que se distingue: sólido, húmedo, plástico y líquido (Figura 1.3).

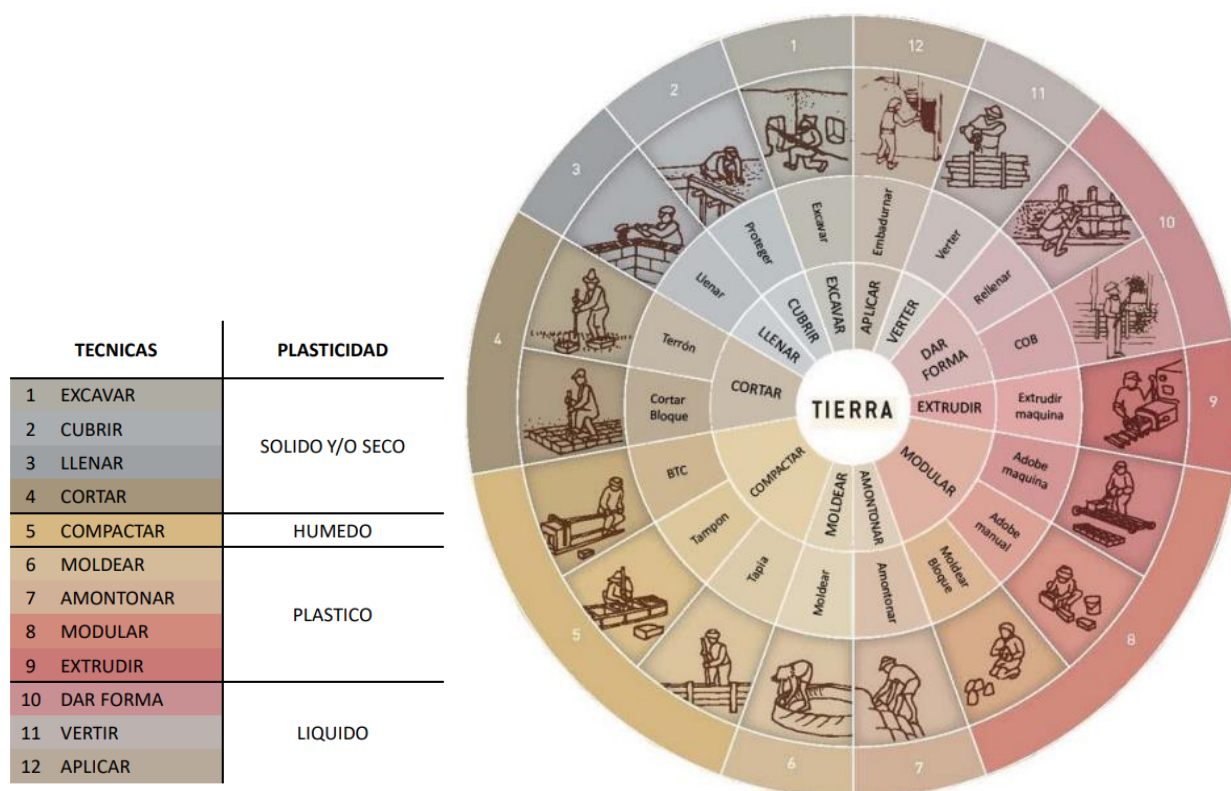


Figura 1.3. Clasificación de las Técnicas de Construcción con Tierra

De los tres grandes grupos de sistemas constructivos señalados destacar la tapia (monolítica portante), el adobe (albañilería) y el BTC o “Bloque de Tierra Comprimida” (albañilería). Estos dos tipos de forma de construcción con tierra son los más destacados en España, no solo formando parte de la cultura monumental, sino también de construcciones actuales en zonas menos industrializadas del territorio nacional.^[2]

1.1.1 Adobe

El adobe es un bloque de tierra arcillosa amasada con arena o paja cortada, moldeada en forma prismática como el ladrillo y secado al aire. Esta técnica tiene su origen en épocas remotas y su uso es más habitual en regiones donde escasea la piedra.

La tierra arcillosa se coloca en un molde en forma de paralelepípedo colocado sobre una superficie plana o el mismo terreno (Figura 1.4). Una vez se desmolda, se deja secar al sol durante unas tres semanas ofreciendo una resistencia y durabilidad razonables.



Figura 1.4. Bloques de adobe

1.1.2 Tapia

Esta forma de construcción con tierra cruda es la más utilizada en la arquitectura monumental, la cual consiste en la realización *in situ* de grandes bloques de tierra encofrada y compactada. Esta técnica se basa en la compactación manual de la tierra mediante un pisón o de forma más actualizada con apisonadores eléctricos, compactándose sobre un encofrado desmontable de madera. La tierra se añade por tongadas comprendidas entre los 10 y 20 cm y, cada tongada, se compacta antes de verter la siguiente repitiendo el proceso hasta la parte superior del molde.

En comparación con técnicas en las que la tierra se usa en un estado más húmedo, la tapia proporciona una retracción más baja al haber una menor diferencia de humedad entre el estado inicial y final de la tierra empleada y, a su vez, una mayor resistencia. La tapia debe ser más arenosa que el adobe y con una dosificación granulométrica en la que es fundamental la presencia de áridos de todos los tamaños. La ventaja respecto al adobe es que las construcciones de tapial son monolíticas y por ello proporcionan una mayor durabilidad (Figura 1.5).



Figura 1.5. Castillo de Biar, Alicante

1.2. Interés de la tierra como material de construcción

La tierra como material de construcción presenta diversos intereses y ventajas, los cuales se pueden clasificar desde distintos puntos de vista. Estos pueden ser principalmente el económico, medioambiental, social o patrimonial.

En primer lugar, afrontándolo desde el ámbito económico, la tierra es un material que tiene un bajo coste de obtención y la mano de obra empleada en las construcciones realizadas con tierra no tiene que estar altamente cualificada.

A su vez, en relación con el ámbito social, es un elemento muy presente en las culturas de países en vías de desarrollo donde se sigue empleando para la construcción de viviendas y se siguen perfeccionando las técnicas de construcción empleadas durante siglos. Muchas de estas técnicas han ido añadiendo elementos a las construcciones con tierra, los cuales permitían adaptarse a las particularidades naturales de cada región. Un caso notable son los muros de tapial reforzados con bambú que se desarrolló en 1978 como parte de un proyecto de investigación en Guatemala, los cuales demostraron añadir cuatro veces más resistencia a flexión según las fuerzas horizontales originadas por un sismo que un muro de 14 cm de espesor.^[3]

La construcción con tierra es tan antigua como el ser humano y está extendida por los cinco continentes donde muchas de esas construcciones son consideradas Patrimonio de la Humanidad (Figura 1.6). Durante el siglo XIX se empezó a tomar una mayor conciencia sobre la importancia del patrimonio cultural y se empieza a introducir el concepto de la conservación, mantenimiento y restauración del patrimonio edificado. Esta idea evoluciona hasta 1972 donde en la Conferencia General de la UNESCO se aprueba la *Convención sobre la protección del patrimonio cultural y natural* en el cual se incluyen las construcciones con tierra cruda.^[2]

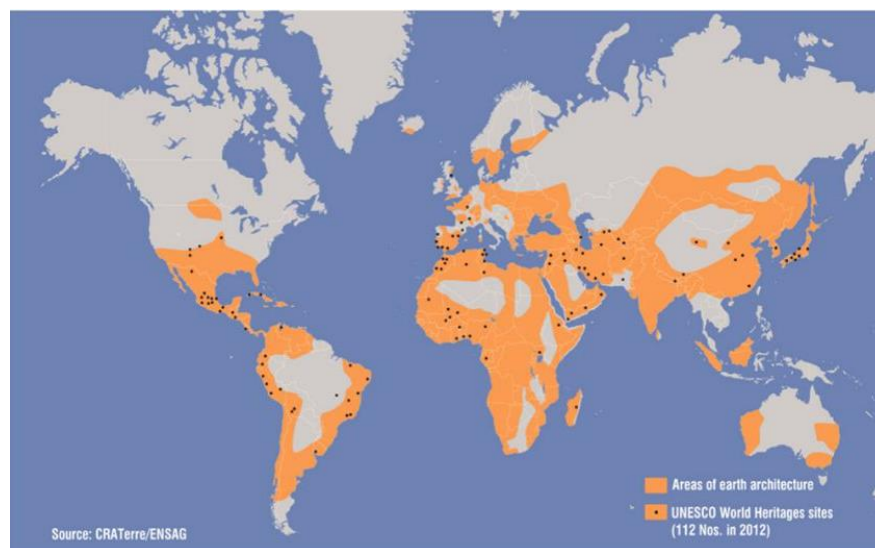


Figura 1.6. Áreas de construcción con tierra y lugares que son Patrimonio de la Humanidad

Por último, desde el ámbito medioambiental, la contaminación es uno de los grandes problemas del ser humano en la actualidad y en el futuro más próximo. La escasez de determinados recursos, los métodos de obtención de ciertos materiales de construcción y la creciente demanda de vivienda a nivel mundial no contribuyen de la mejor manera a la preservación del medioambiente. Ante este problema, la tierra es un material idóneo y una posible solución hacia la eficiencia energética y la sostenibilidad.

Presenta numerosas ventajas entre las que destaca el ahorro de energía ya que para su preparación y transporte solo se necesita el 1% de la energía requerida en comparación con la preparación, transporte y elaboración del hormigón armado o ladrillo cocido.^[3]

1.3. Desarrollo de la tapia en España

La época musulmana en la Península Ibérica fue la más significativa para el desarrollo de nuevas tecnologías en construcción con tierra, pero no fue el origen de la misma. Investigaciones recientes atribuyen este hecho a los pueblos presentes en la península antes de la llegada de los romanos, los cuales están basados en yacimientos como el de Pintia del siglo IV a.C (Padilla de Duero) o el de Matallana del siglo III a.C (Villalba de los Alcores). La aparición de la arquitectura con tapia en España data del siglo I según el testimonio de Plinio el Viejo, el cual hace referencia a torres y atalayas realizadas con tierra.^[4]

En España, la construcción con tierra se mantuvo presente, mayormente en el medio rural, hasta los años 60 del siglo XX debido a la pobreza y escasez de materiales derivada de la Guerra Civil Española (1936-1939), a una menor densidad de población y a un mayor carácter rural. Esto supuso la continuación en el uso de técnicas como el adobe y la tapia.

La industrialización y globalización del mercado constructivo nacional e internacional a lo largo del siglo XX, el creciente aumento del nivel de vida, la disminución de población en el medio rural hacia las ciudades y la modernización han llevado a las construcciones con tierra a un segundo plano siendo desplazada por el hormigón y el acero.

Las construcciones con tapia a nivel nacional se clasifican en dos tipos de arquitectura: por un lado está la arquitectura popular como el caso de viviendas, granjas o molinos y, por otro lado, la arquitectura monumental entre las que se distinguen edificaciones militares, defensivas, civiles y religiosas. En todos estos tipos de construcciones toma un valor significativo la restauración del patrimonio lo que se considera otro motivo para la investigación y desarrollo de una normativa reguladora sobre la tapia. En la actualidad, en España, únicamente existe una norma para el uso de la tierra como material de construcción en el caso del BTC, la cual se aprobó en 2008 como norma UNE 41410 “*Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*”. La normativa UNE en torno a la tapia está actualmente en desarrollo.^[1,3,9]

Desde un punto de vista más local, en Andalucía, en los últimos quince años se han incrementado el número de restauraciones sobre construcciones con tapia tomando una mayor conciencia sobre el valor patrimonial presente. Algunos de los ejemplos más significativos son el Alcázar de la Puerta de Sevilla, Carmona (Sevilla) o el lienzo norte de la muralla de la villa, Alcalá de Guadaíra (Sevilla) (Figura 1.7).^[4]



Figura 1.7. Castillo de Alcalá de Guadaíra, Sevilla

1.3.1. El desarrollo de la técnica del tapial

Tradicionalmente, la técnica del tapial se distingue del resto de formas de construcción con tierra en la necesidad de un encofrado de madera con unas características determinadas, la presencia de un pisón para la compactación manual de las tongadas de material y la ausencia de andamios como medio auxiliar para elevar los muros (Figura 1.8). El apisonado se realizaba desde el interior del molde y el desplazamiento horizontal del tapial lo realizaban los tapiadores desde el muro, lo que suponía un riesgo notable de accidente para los operarios.^[1]

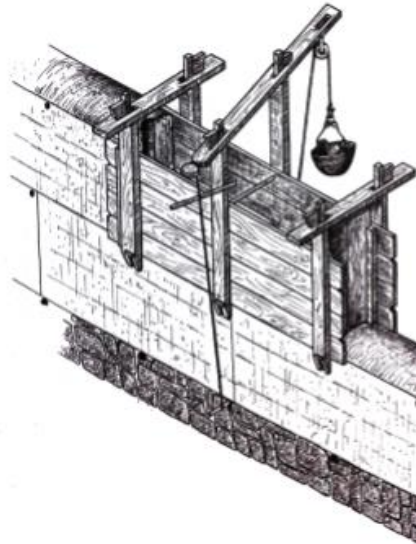


Figura 1.8. Tapial tradicional de la comarca de Els Ports, Castellón

Desde principios del siglo XX, se han realizado distintos avances con el objetivo de disminuir el riesgo por parte del operario en el puesto de trabajo así como de aumentar la capacidad de producción. Para ello, se redujeron el número de operaciones de montaje y desmontaje con encofrados en forma de L o de T que solventan adecuadamente los encuentros entre muros. De la misma forma, se han introducido moldes que permiten el desplazamiento horizontal del tapial mediante pequeños rodillos.

Los pisones manuales se han sustituido por pisones mecánicos, los cuales contribuyen al incremento de la producción, aseguran un mayor grado de compactación y disminuye el esfuerzo del operario (Figura 1.9). Como consecuencia, los tiempos de compactación se reducen de dos a cuatro veces respecto al apisonado manual. En el caso de las agujas inicialmente eran de madera y después se introdujeron de hierro. Este es un elemento normalmente de sección circular sobre el cual descansan los tableros del tapial y, el cual, se probó eliminar para evitar los agujeros que quedan en el muro una vez se han retirado.^[1]

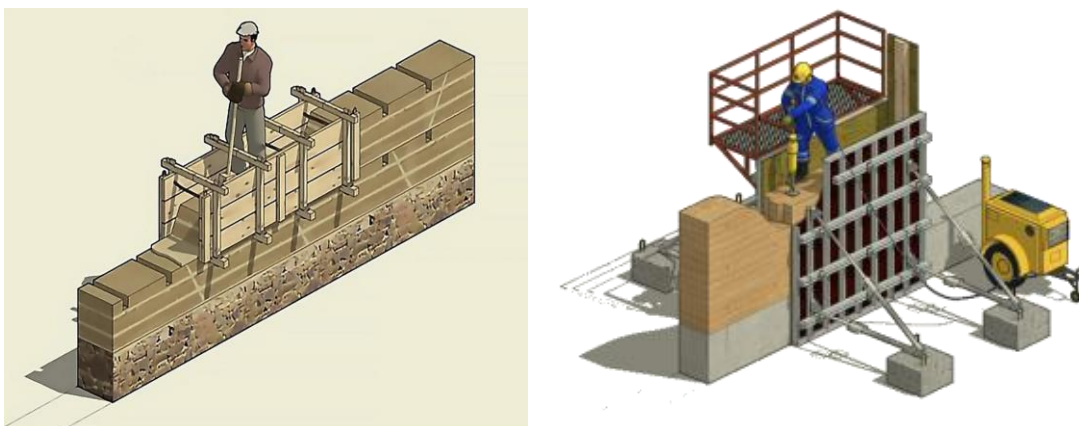


Figura 1.9. Representación tapial tradicional y contemporáneo

Esta evolución en la técnica es una consecuencia del desarrollo de la industria del hormigón y la maquinaria de elevación asociada, la cual ha contribuido a una producción en mayor escala en el caso de la tapia. A su vez, se han obtenido unos mejores acabados y un perfeccionamiento de la estética siendo uno de los puntos más destacados de la construcción con tapia.

No solo se ha evolucionado en la estructura del tapial sino también en la misma obtención de la tapia. Se ha conseguido que el material final sea más homogéneo mediante el control de la granulometría de la tierra que se va a emplear y el uso de estabilizadores como la cal.^[1]

1.3.2. Construcciones actuales con tapia y motivación del proyecto

Existen distintas construcciones con tapia desarrolladas en los últimos años en distintos puntos de la geografía nacional como es el caso del teatro municipal de Balaguer (Lleida) o la piscina cubierta municipal de Toro (Zamora). El hecho de que se esté empezando a promover todo tipo de edificaciones basadas en la tierra como material constructivo principal y muchas de ellas mediante la técnica de la tapia supone un valor añadido al proyecto y a la línea de investigación posteriormente descrita.

Desde el punto de vista académico, la línea de investigación que sigue el proyecto pertenece al Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla en la que se analiza el uso de la tierra como material de construcción y se contribuye al desarrollo de una norma técnica para la tapia, la cual se ha reinventado con el avance de la tecnología con el propósito de mejorar la puesta en obra.

Otro valor añadido al proyecto perseguido por esta línea de investigación es el hecho de ensayar con probetas de tapia debido al carácter ecológico y medioambiental de las construcciones con tierra. Dentro de esta línea de investigación, se va un paso más allá empleando en la formación de las probetas el vidrio como material reciclado dando así una posible salida a un desecho generado en gran cantidad en la sociedad actual.

Una construcción con tapia actual que pertenece a la línea de investigación del proyecto es el caso de la construcción con tapia de una biblioteca en la localidad de Valverde de Burguillos, Badajoz (Figura 1.10). Este es un punto de lectura situado en la piscina municipal de la localidad que cuenta con una superficie de unos 30 m².



Figura 1.10. Biblioteca Valverde de Burguillos, Badajoz

Otro ejemplo actual es el de la piscina cubierta municipal de Toro (Zamora) (Figura 1.11). Este se trata de un edificio que cuenta con tres plantas: semisótano, planta baja y primera con una superficie en la planta baja de 1081 m². En esta construcción se ha empleado la técnica de la tapia para los muros de accesos, vestidor y el recinto de la piscina, cuya tierra se ha estabilizado con cemento blanco y cal.^[1]



Figura 1.11. Piscina municipal de Toro, Zamora

1.4. Objetivos del proyecto

Como se ha mencionado anteriormente, la tierra como material de construcción presenta numerosas ventajas tales como su reutilización, la ausencia de contaminación al medioambiente o su gran facilidad de obtención. Uno de los problemas más significativos que enfrenta la sociedad actual es el aumento de la contaminación y de los residuos generados. En este reto, la ingeniería tiene un gran papel por delante.

Desde el punto de vista de constructivo, esta línea de investigación intenta aunar la tierra como posible material para el futuro de la construcción junto con la reutilización de residuos, los cuales puedan mejorar el comportamiento mecánico de la misma, siendo en este proyecto el vidrio el residuo empleado. Todo ello persigue la colaboración para el desarrollo de una normativa reguladora para el uso de la tapia.

La campaña experimental comienza con el ensayo granulométrico y la obtención del vidrio triturado en los laboratorios de la ETS de Ingeniería de Edificación de Sevilla. A continuación, se llevará a cabo en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla el proceso de fabricación de las probetas mediante la distinción entre probetas con y sin vidrio, el cual será asistado por profesores de ambos centros mencionados.

Una vez se haya completado la fabricación y secado de las probetas se procederá a los ensayos de compresión simple y ultrasonidos a distintas edades: 30, 60, 90 y 120 días. Para el ensayo a compresión se empleará un sistema de vídeo extensometría, el cual permite medir el desplazamiento relativo de unos patrones colocados en las probetas previamente al ensayo de compresión y, para el ensayo de ultrasonidos, un sistema emisor-receptor mediante palpadores, los cuales permiten el cálculo de la velocidad de onda a través de la probeta.

El objetivo final es comprobar cómo afecta la estabilización con cal y la adición de vidrio en las propiedades mecánicas de las probetas. Con los ensayos a distintas edades de secado, se persigue obtener la ley de comportamiento tensión-deformación para las probetas con y sin vidrio así como la evolución de la resistencia a compresión simple (f_c). A su vez, se comprobará el efecto de la cal en las distintas edades planteadas.

1.5. Cronograma del proyecto

En primer lugar, antes de iniciar las distintas tareas que comprenden el proyecto, se plantea un cronograma con las tareas a realizar (Tabla 1.1). Desde este punto de organización se tienen en cuenta ciertos aspectos del proceso de ejecución más complejos con el objetivo de tener margen de maniobra en el caso de posibles contratiempos.

El cronograma incluye todo el proceso de preparado de la mezcla, obtención del vidrio triturado, calibración de las máquinas con las que se realizarán los ensayos así como sus fechas de realización. Finalmente, teniendo en cuenta todo el proceso seguido y los inconvenientes que han ido surgiendo durante el desarrollo del proyecto, el cronograma resultante con las actividades llevadas a cabo es el siguiente:

Semana 1 14/02 – 20/02	Triturado del vidrio
Semana 2 21/02 – 27/02	Transporte vidrio y molde para probetas a la ETSI
Semana 3 14/03 – 20/03	Ensayo Próctor Normal Fabricación probetas con vidrio
Semana 4 21/03 – 27/03	Fabricación probetas sin vidrio Calibración Ensayo Mecánico y Ultrasonidos Distribución y clasificación de probetas para su secado
Semana 5 18/04 – 24/04	Ensayo Ultrasonidos probetas 30 días con/sin vidrio Ensayo Mecánico probetas 30 días con/sin vidrio
Semana 6 23/05 – 29/05	Ensayo Ultrasonidos probetas 60 días con/sin vidrio Ensayo Mecánico probetas 60 días con/sin vidrio
Semana 7 27/06 – 03/07	Refrentado de probetas 90 días Ensayo Ultrasonidos probetas 90 días con/sin vidrio Ensayo Mecánico probetas 90 días con/sin vidrio
Semana 8 18/07 – 24/07	Refrentado de probetas 120 días Ensayo Ultrasonidos probetas 120 días con/sin vidrio
Semana 9 25/07 – 31/07	Ensayo Mecánico probetas 120 días con/sin vidrio Prueba reacción de la cal en probetas de 120 días

Tabla 1.1. Cronograma del proyecto

2 PROPIEDADES DEL MATERIAL

El material fundamental para la obtención de la tapia con la que se fabricarán las probetas es la tierra. En este punto de partida es fundamental definir sus componentes y las proporciones de cada uno de ellos con el objetivo de alcanzar una mezcla homogénea. La proporción influirá en las propiedades mecánicas de las probetas, en su apariencia a simple vista así como en el proceso de fabricación y secado.

Atendiendo al CTE – DB – SE – C, los componentes de la tierra se pueden clasificar según el tamaño máximo de sus partículas (Tabla 2.1).

Grava	Arena	Limo	Arcilla
2 – 60 mm	0,06 – 2 mm	0,002 – 0,06 mm	< 0,002 mm

Tabla 2.1. Clasificación de partículas según su tamaño

Los cuatro componentes señalados anteriormente formarán parte de la mezcla para la obtención de la tapia junto con la adición de un estabilizador como la cal y del vidrio reciclado triturado.

De todos ellos, tiene una relevancia especial la arcilla ya que cumple la función de adherir el resto de componentes. Esta aporta plasticidad a la mezcla y está conformada por minerales muy finos, los cuales permiten amplias posibilidades de manipulación y deformabilidad con la adición de agua a la mezcla. Esta propiedad se caracteriza por el límite plástico, la cual permitirá que la mezcla final se pueda adaptar a las distintas cavidades del molde en el proceso de compactación y fabricación de las probetas aportándole así una forma prismática con mínimas imperfecciones.

En el proceso gradual de adición de agua a la arcilla hay que atender la cantidad añadida. El objetivo es trabajar con una mezcla plástica cuyo límite no se pretende superar alcanzando el límite líquido. El agua añadida será cedida por la arcilla lo que marcará la fase de secado de las probetas. Durante esta fase se comprobará que la cantidad de arcilla añadida haya sido la correcta ya que, en el caso de que se haya añadido un porcentaje de arcilla superior al establecido, se producirá una retracción excesiva pudiendo provocar grietas en las probetas.

La arena jugará un papel fundamental en la posible aparición de una retracción no deseada contribuyendo a la reducción de huecos y con ello de la retracción. Por otra parte, la grava cumplirá un papel parecido al del hormigón proporcionando resistencia al material mientras que, el limo, en menor proporción, aportará cohesión a la mezcla en estado húmedo facilitando su manejo o transporte.^[1]

Con todos los componentes descritos hasta ahora y en una correcta proporción, se alcanzaría la mezcla necesaria para la obtención de la tapia. A continuación, se le añadirá la cal como estabilizador cuya influencia en la resistencia mecánica se pretende comprobar. La cal empleada endurecerá las probetas por secado y reaccionando con el dióxido de carbono por el proceso de carbonatación. Este posible aumento en la resistencia a compresión simple se espera que se produzca a largo plazo. A parte del aumento a compresión, la adición de cal también mejora la resistencia de la tapia ante uno de los aspectos más desfavorables para la misma como es la erosión hídrica.^[5]

En cuanto a la adición del vidrio, con el objetivo de marcar dos procesos de fabricación diferenciados entre probetas con y sin vidrio, se realizarán dos tandas de fabricación separadas. Las mezclas empleadas tendrán exactamente la misma proporción de componentes sólo que en una de ellas se realizará una sustitución parcial de la arena fina y gruesa por el vidrio. A su vez, el vidrio se añadirá en dos estados: por un lado, vidrio medio triturado y, por otro lado, vidrio grueso sin triturar.

2.1 Granulometría

La granulometría juega un papel fundamental en la obtención de una mezcla válida para la tapia. En relación a este aspecto, no existen unos valores fijos a añadir para cada uno de los componentes sino más bien unos límites aproximados establecidos según la experiencia de distintos autores. Este criterio tiene un aspecto más regional que universal debido a las particularidades naturales de cada zona así como de las características de la tierra extraída. En la construcción con tapia, todas estas variantes en los porcentajes añadidos de cada material persiguen un mismo objetivo que es la correcta cohesión y comportamiento mecánico de la tapia en la construcción.

Teniendo en cuenta esto, se deberán analizar las variaciones en las proporciones planteadas por distintos autores con el objetivo de obtener una aproximación adecuada que cumpla los requisitos establecidos anteriormente para la mezcla.

Como primera referencia, se tiene en cuenta la publicación del MOPT “*Bases para el Diseño y Construcción con Tapial*” de Gonzalo Bauluz y Pilar Bárcena junto con el trabajo expuesto en el libro “*Construire en terre*” del Centro de Investigación y Aplicación del Material Tierra de Francia (CRATerre) (Tabla 2.2).^[1,6]

Grava	Arena	Limo	Arcilla
18%	40%	22%	20%

Tabla 2.2. Porcentajes componentes tapia, MOPT y CRATerre

Otro planteamiento también publicado desde el CRATerre en el libro “*Traité de Construction en Terre*”, de H. Houben y H. Guillaud (Tabla 2.3).^[1,7]

Grava	Arena	Limo	Arcilla
10 – 54%	24 – 50%	12 – 22%	10 – 18%

Tabla 2.3. Porcentajes componentes tapia, CRATerre

En el ámbito nacional, según el PIET – 70, los porcentajes empleados se muestran en la Tabla 2.4.^[1]

Grava	Arena	Limo	Arcilla
10 – 20%	10 – 40%	20 – 40%	10 – 40%

Tabla 2.4. Porcentajes componentes tapia, Prescripciones del Instituto Eduardo Torroja

Teniendo en cuenta el trabajo desarrollado durante las últimas décadas por distintos autores, se pueden plantear unos porcentajes cuyos límites superiores e inferiores sean el resultado de todos ellos. La composición aproximada de la mezcla sin tener todavía en cuenta la adición de la cal y del vidrio se muestran en la Tabla 2.5.

Grava	Arena	Limo	Arcilla
10 – 54%	10 – 50%	12 – 40%	10 – 40%

Tabla 2.5. Porcentajes planteados para la mezcla del proyecto

Sea cual sea el porcentaje de adición de cada uno de los componentes anteriores debe tener el índice de plasticidad adecuado para su manejo y compactación teniendo en cuenta la adición de agua. Esto evitará superar el límite líquido a partir del cual se pueden producir fenómenos no deseados como la falta de cohesión.

Teniendo en cuenta los porcentajes propuestos para la mezcla se procede a añadir la cal y el vidrio. Como se ha mencionado anteriormente, se va a fabricar un grupo de probetas con vidrio y otro sin vidrio, diferencia que determina dos granulometrías y procesos de fabricación distintos.

En el caso del lote de fabricación de probetas sin vidrio a la mezcla se le añade un 5% de cal sobre el total quedando los porcentajes mostrados en la Tabla 2.6.

Grava	Arena	Limo	Arcilla	Cal
15%	50%	20%	15%	5%

Tabla 2.6. Porcentajes mezcla probetas sin vidrio

2.1.1 Granulometría vidrio

En el lote de fabricación de probetas con vidrio, como se ha señalado anteriormente se va a añadir el vidrio en dos estados: vidrio triturado (medio) y vidrio sin triturar (grosso) (Figura 2.1-2.2). La incorporación del vidrio reciclado se basa en la sustitución parcial de arena por una cantidad determinada del mismo. Esta sustitución parcial se puede realizar desde cuatro porcentajes distintos:

- Sustitución de arena/limo por vidrio al 0%

No habrá presencia alguna de vidrio en la mezcla

- Sustitución parcial de arena/limo por vidrio al 50%

Presencia similar de vidrio, arena fina y arena gruesa en la mezcla

- Sustitución parcial de arena/limo por vidrio al 75%

Mayor presencia de vidrio que de arena fina y gruesa

- Sustitución de arena/limo por vidrio al 100%

No habrá presencia de arena, la cual habrá sido sustituida en su totalidad por el vidrio

Descartando los casos al 0% donde no habría vidrio en la mezcla y al 100% donde la arena se sustituiría completamente por el vidrio, llegamos a dos situaciones posibles: la sustitución al 50 o al 75% de la arena por el vidrio. Para su correcta elección se sometió al vidrio a un estudio granulométrico el cual fue realizado en la ETS de Ingeniería de Edificación de Sevilla.



Figura 2.1. Vidrio medio sin triturar

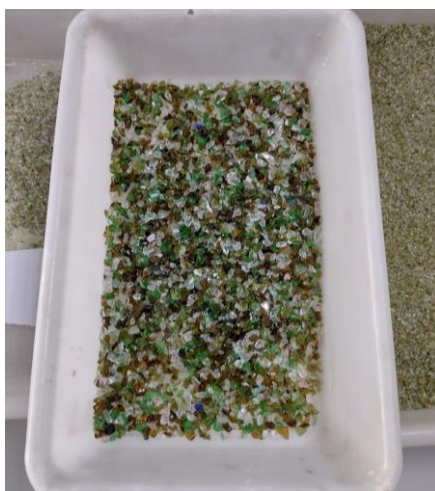


Figura 2.2. Vidrio grueso sin triturar

Las distintas tipologías de vidrio se facilitan desde una empresa de origen local, la cual lo proporciona en dos estados: vidrio grueso y vidrio medio. Para el ensayo a realizar se tritura parte de la totalidad de ambos tipos de vidrios. Para la granulometría inicial se toma una muestra de unos 200g de cada uno de los tipos de vidrio señalados en la Tabla 2.7.

VIDRIO				
Tamaño	Vidrio grueso sin triturar (g)	Vidrio grueso triturado (g)	Vidrio medio sin triturar (g)	Vidrio medio triturado (g)
8 mm	0	0	0	0
4 mm	98,9	0	0	0
2 mm	93,4	9,3	25,6	6,4
1 mm	7,8	43,3	178,7	83,9
0,5 mm	0	48,4	0,3	37,7
0,250 mm	0	36,6	0	27,5
0,125 mm	0	35,1	0	30
0,063 mm	0	17,3	0	12,9
Bandeja	0	8,7	0	5,1
Total	200,1	198,7	204,6	203,5

Tabla 2.7. Granulometría inicial vidrio

El estudio granulométrico realizado se basa en el método de Fuller. Este método consiste en mezclar los áridos presentes de tal forma que las curvas granulométricas obtenidas de cada uno de ellos se adapten lo máximo posible a la curva ideal de Fuller mediante un proceso de tanteo sucesivo. Este proceso de optimización parte de unos porcentajes iniciales de áridos a partir de los cuales se obtiene la mezcla ideal, pero en este caso tanto los porcentajes de sustitución arena-vidrio como los porcentajes de cada tipo de vidrio dentro de la sustitución están fijados. De tal forma que con la granulometría realizada, se comprobará qué tipo de sustitución parcial es válida en comparación con la curva ideal de Fuller.

Para llevar a cabo el ensayo se emplearon los siguientes tamices normalizados según la norma UNE 7050-2:1997, mientras que para la sedimentación de los distintos tipos de tamaño de partículas de vidrio se siguió la norma UNE 103-102:1995. Los tamices normalizados empleados fueron los siguientes: 125, 63, 31.5, 16, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125, 0.063 mm.^[10,11]

A continuación, se recogen los siguientes datos para cada una de las dos sustituciones: tipos de vidrio empleados y resultados obtenidos en cada granulometría (Figura 2.3-2.6) (Tabla 2.8-2.9).

- Sustitución al 50%

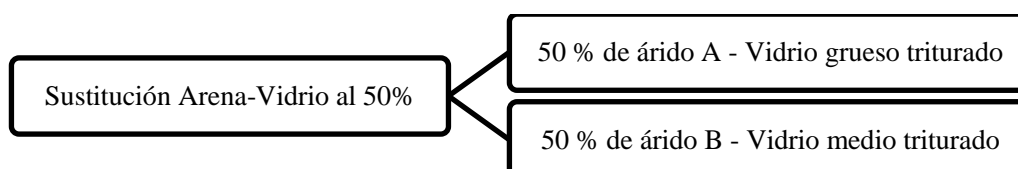


Figura 2.3. Sustitución Arena-Vidrio al 50% y tipos de vidrios empleados

MEZCLA (50% A+ 50%B)				
Tamiz	% Árido A	% Árido B	% y (Mezcla)	Fuller
125	100	100	100	100
63	100	100	100	100
31,5	100	100	100	100
16	100	100	100	100
8	100	100	100	100
4	100	100	100	100
2	95,35	96,77	96,06	100
1	73,70	54,49	64,09	70,7
0,5	49,50	35,48	42,49	50
0,25	31,20	21,62	26,41	35,4
0,125	13,65	6,50	10,08	25
0,063	5,00	0,00	2,50	17,7

Tabla 2.8. Granulometría mezcla 50% A y 50% B

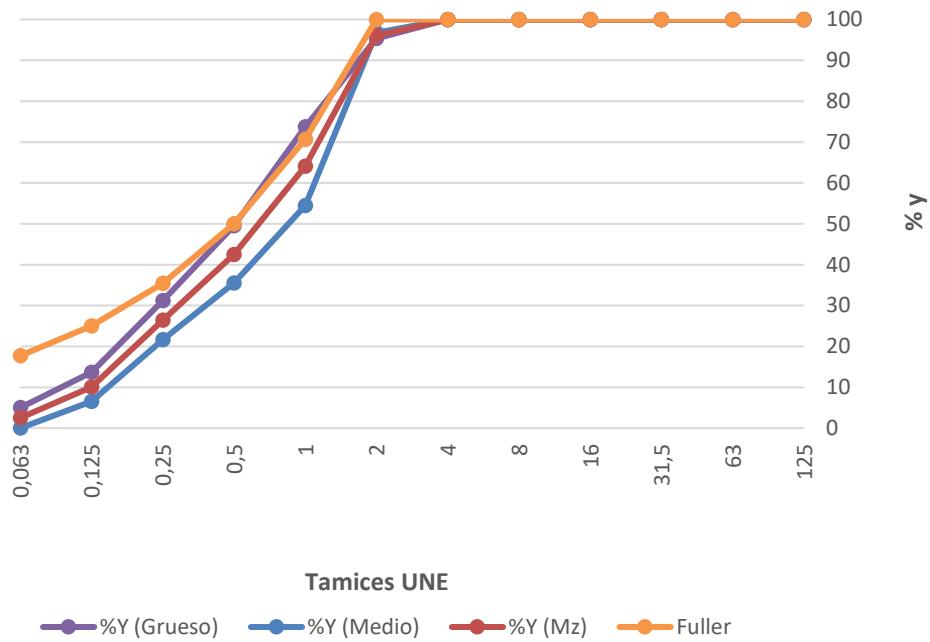


Figura 2.4. Granulometría mezcla 50% A y 50% B

- Sustitución al 75%

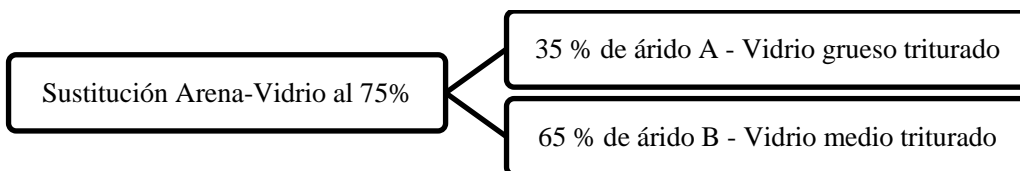


Figura 2.5. Sustitución Arena-Vidrio al 75% y tipos de vidrios empleados

MEZCLA (35%A+65%B)				
Tamiz	% y (A)	% y (B)	% y (Mz)	Fuller
125	100	100	100	100
63	100	100	100	100
31,5	100	100	100	100
16	100	100	100	100
8	100	100	100	100
4	50,57	100,00	82,70	70,70
2	3,90	96,08	63,81	50,00
1	0,00	64,28	41,78	35,40
0,5	0,00	42,75	27,79	25,00
0,25	0,00	26,73	17,37	17,70
0,125	0,00	10,45	6,79	12,50
0,063	0,00	2,90	1,89	8,80

Tabla 2.9. Granulometría mezcla 35% A y 65% B

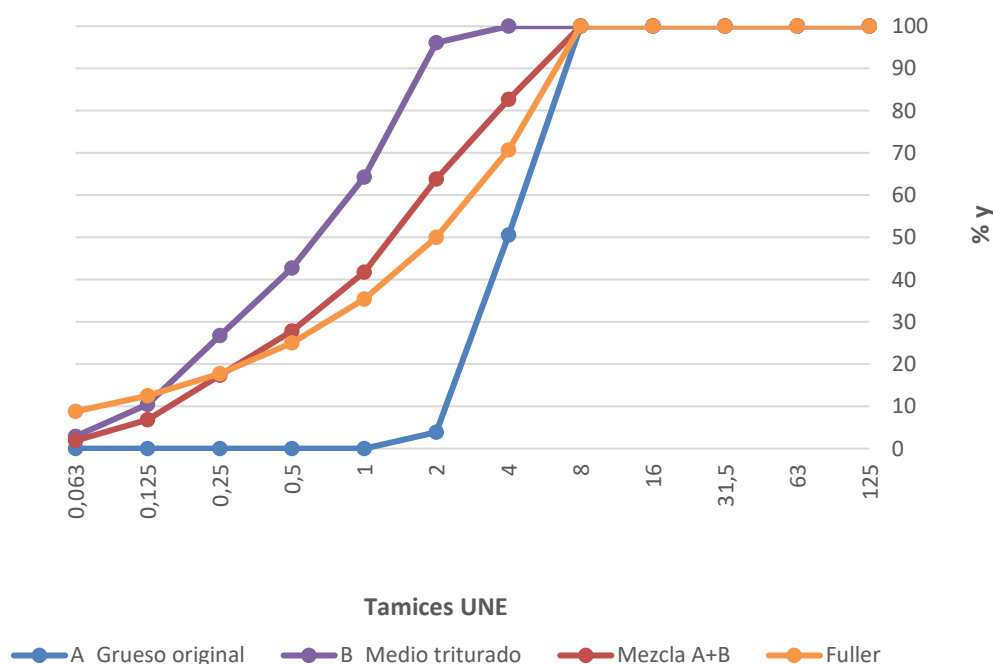


Figura 2.6. Granulometría mezcla 35% A y 65% B

De los resultados obtenidos se deduce que la sustitución parcial arena-vidrio al 50% no es válida. Esto es debido a que en los tamices comprendidos entre los 16 y 0.063 mm, la curva de la mezcla está por debajo de la curva ideal de Fuller. Se deduce que de la mezcla al 50% de vidrio grueso triturado y 50% medio triturado pasa menos cantidad de la que debe pasar debido a que el tamaño de las partículas en los tamices indicados es más grueso que lo señalado por Fuller.

Por el contrario, en la sustitución parcial de arena-vidrio al 75% se dan unas condiciones válidas. En comparación con el caso anterior, la mayor parte de la curva de la mezcla está por encima de la curva ideal de Fuller exceptuando ciertos valores comprendidos en los tamices de menor tamaño. La cantidad de partículas de vidrio que pasan en los tamices comprendidos entre 0.25 y 16 mm se encuentra a unos niveles iguales o superiores que los marcados por Fuller.

Del proceso se deduce que el caso óptimo es la sustitución al 75% con la siguiente mezcla: 35% de vidrio grueso sin triturar y 65% de vidrio medio triturado, la cual se empleará en la fabricación de las probetas con vidrio (Tabla 2.10). Persiguiendo la homogeneidad de la mezcla en las probetas con vidrio, se espera que el vidrio grueso tenga una función parecida a la grava proporcionando cierta resistencia mientras que el vidrio medio triturado se asimile a la arena ocupando posibles huecos presentes en la misma.

Grava	Arena	Limo	Arcilla	Cal	Vidrio triturado	Vidrio sin triturar
15%	50%	20%	15%	5%	35%	65%

Tabla 2.10. Porcentajes mezcla probetas con vidrio

2.2 Ensayo Próctor Normal

La realización de este ensayo fue guiada y asistida por el departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la ETS de Ingeniería de Edificación de Sevilla. El objetivo del ensayo es conocer la densidad seca máxima a partir de la cual se obtiene una humedad óptima para la mezcla asegurando un grado de compactación máximo. Con los resultados obtenidos se realizará una gráfica basada en cinco puntos cuyo punto de inflexión será el valor buscado. El proceso descrito a continuación se basa en la norma UNE 103-500:1994.^[12]

En primer lugar, se realizó una mezcla de 10 kg basándonos en las proporciones señaladas en la tabla 2.6 sin añadir agua y sin tener en cuenta el porcentaje de cal. A esta mezcla se le añadirá agua gradualmente tomando como referencia el peso de la mezcla. Se añadirá un total de cinco veces pequeñas cantidades de agua y, en cada ocasión, se realizará el ensayo obteniendo así los puntos de la gráfica representada posteriormente. Los porcentajes de agua añadidos serán del: 3, 2, 2, 3 y 3% en el orden indicado.



Figura 2.7. Molde con muestra compactada, Ensayo Próctor Normal



Figura 2.8. Muestra compactada y desmoldada, Ensayo Próctor Normal

En cada una de las muestras con porcentajes de agua distintos, se realizó la compactación del material en tres tongadas distintas lo más uniformemente posible mediante 26 golpes bien distribuidos por la superficie (Figura 2.7). Una vez se ha realizado la compactación de las tres tongadas, se desmolda el material compactado, se divide en tres partes y se coge una muestra de unos 300g de la parte intermedia de cada una de ellas (Figura 2.8). Para cada uno de los cinco ensayos, estas muestras se secaron en el horno durante 24 horas y se obtuvieron medidas antes y después de introducirlas a secar con el objetivo de obtener la diferencia de humedad.

Las medidas tomadas se realizaron para obtener los valores necesarios de humedad y densidad seca de cada una de las muestras obteniendo los resultados mostrados en las Tablas 2.11-2.12.

Muestra	1	2	3	4	5
% Agua añadida	3 %	2 %	2 %	3 %	3 %
Molde + Suelo + Agua (g)	7928	7975	8128	8030	7971
Molde (g)	5912	5912	5912	5912	5912
Suelo + Agua (g)	2016	2063	2216	2118	2059
Suelo (g)	1.896,13	1.918,54	1.975,13	1.830,67	1.754,75
Densidad seca (g/cm³)	1,92	1,94	2,00	1,85	1,77

Tabla 2.11. Medidas densidad seca, Ensayo Próctor Normal

Muestra	1	2	3	4	5
Tara (g)	157	156	155	197	202
Tara + Suelo + Agua (g)	341	613	569	455	493
Suelo + Agua (g)	184	457	414	258	291
Tara + Suelo (g)	331	581	524	420	450
Suelo (g)	174	425	369	223	248
Agua (g)	11	32	45	35	43
Humedad (%)	6,32 %	7,53 %	12,20 %	15,70 %	17,34 %

Tabla 2.12. Medidas humedad, Ensayo Próctor Normal

Para la obtención de la humedad y la densidad seca se han empleado las ecuaciones 1-2.

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Agua}}{\text{Suelo}} * 100 \quad (1) \quad \text{Densidad seca} = \frac{\text{Suelo}}{\text{Volumen molde}} \quad (2)$$

Por otro lado, la energía de compactación por impacto se calcula a partir de la masa del vástago, el valor de la gravedad y la altura de caída del pisón del vástago. Se añade dicho cálculo junto con la energía de compactación por tongada y por muestra en las ecuaciones 3-4.

$$E_C = m * g * h = 2,5 \text{ kg} * 9,807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,3 \text{ m} = 7,3575 \text{ J/impacto} \quad (3)$$

$$E_t = E_C * 3 * 26 = 573,885 \text{ J/muestra} \quad (4)$$

Inicialmente no se sabe el porcentaje de humedad del que se parte por lo que se decide añadir cantidades de agua que supongan un pequeño porcentaje del total de la mezcla. Como se ha señalado anteriormente, se ha realizado el ensayo en cinco puntos aunque podrían ser más obteniendo así una gráfica más exacta. Si existe como limitación el hecho de que la mezcla compactada no presente resistencia alguna a la hora de compactarla con el pisón, lo que se significa que hay un exceso de agua en la mezcla.

Con la mezcla realizada y las proporciones indicadas, las cuales se emplearán posteriormente en la fabricación de ambas tandas de probetas, el resultado obtenido en el ensayo se muestra en la Figura 2.9.

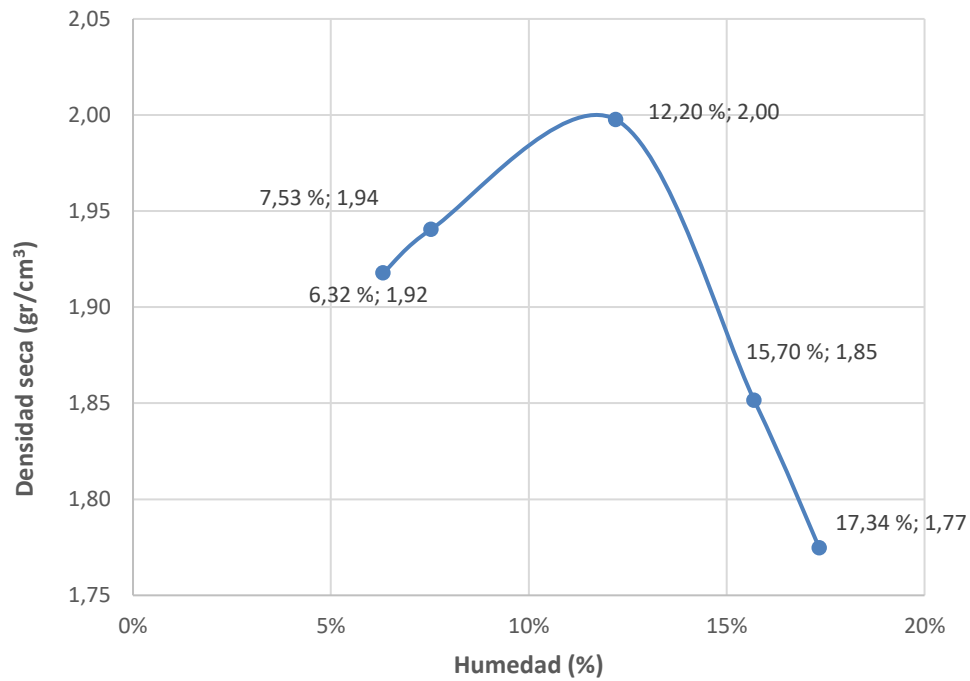


Figura 2.9. Gráfica Ensayo Próctor Normal

Se puede observar que la **máxima densidad seca** obtenida ha sido de **2 gr/cm³** para un porcentaje de **humedad del 12,20%**.

3 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

Para la fabricación de las probetas se ejecutó y planificó una producción en cadena en la que intervino todo el grupo de trabajo. Una vez se habían definido los porcentajes a añadir tanto en la mezcla con vidrio como sin vidrio, se preparó el material necesario para iniciar la fabricación. Esta se realizó en dos fases: una primera fase para las probetas con vidrio y una segunda fase para las probetas sin vidrio. Todas las probetas fabricadas tienen una forma prismática con unas dimensiones de 300x100x100 mm.

3.1 Descripción del molde

El molde fue facilitado por el Departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de Sevilla. Este se basa en una estructura de metacrilato con ciertos refuerzos metálicos en la base, el cual consta de un total de siete piezas: cuatro para las paredes, dos como separación y la base (Figura 3.1). Esta distribución dejaba un total de cuatro huecos con la suficiente altura como para producir un total de ocho probetas fabricadas en dos alturas.



Figura 3.1. Molde fabricación probetas

El molde también contaba con cuatro pasadores ajustables por ambos lados mediante rosca, los cuales proporcionan la presión suficiente a la estructura una vez montada y aseguran su estabilidad ante la alta energía de compactación que se le va a imprimir a la tierra.

Uno de los principales objetivos durante la planificación del proyecto era asegurar la validez del molde. Se debían cumplir varios puntos durante el proceso de compactación como la correcta fijación de las paredes, de tal forma que ejerciesen la suficiente presión a la hora de compactar las tongadas de la mezcla y esto a su vez, resultaría en una distribución uniforme de las cargas durante la compactación. También había que comprobar que la operación de desmolde no era excesivamente compleja de tal forma que se dañasen algunas probetas durante la misma.

Mediante este molde se llevó a cabo la fabricación de piezas de tapia a baja escala en comparación con el tradicional tapial, el cual se ha empleado durante siglos para la construcción de muros de tapia. El material del molde también supone un avance al ser de metacrilato mientras que los tapias siempre han sido de madera. Para el uso de la técnica de la tapia a gran escala ya se emplean tapias metálicas, los cuales añaden una mayor resistencia y durabilidad al encofrado.

Uno de los objetivos fundamentales del proyecto es comprobar también que la inclusión de nuevos materiales y maquinaria a la técnica de la tapia puedan contribuir a su desarrollo así como a la mejora de la productividad. El molde descrito cumple todas las funciones principales que debe tener un encofrado. Presentaba la suficiente solidez mediante piezas rigidizadoras, lo que es necesario para el proceso de compactación. A su vez, por su reducido tamaño presentaba una mejor maniobrabilidad en comparación con el tapial clásico así como para las operaciones de desmolde. También es destacable la inalterabilidad del material frente a la madera, el cual no se degrada ante agentes externos como el agua evitando su deformación y el hecho de que pueda afectar a la calidad de las probetas fabricadas. Por último, presenta una mayor funcionalidad asociada al proceso de compactación por su reducido tamaño, lo que por otro lado, deriva en una menor capacidad de producción ya que las dimensiones del tapial tradicional son mayores aunque para el objetivo del proyecto es suficiente.

Para el proceso de fabricación de las probetas así como para la realización de los ensayos se emplea la representación de la Figura 3.2 donde se observa la planta del molde, la cual permite definir el hueco del molde del que procede la probeta así como la definición de los ejes sobre las probetas.

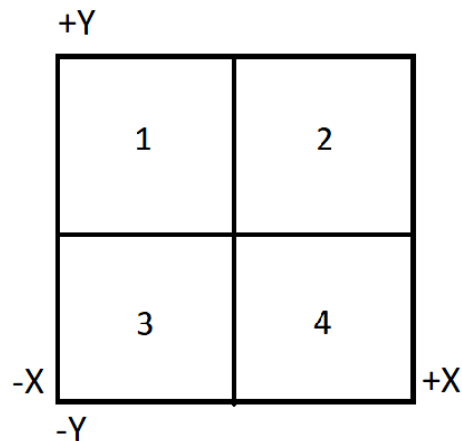


Figura 3.2. Representación ejes y numeración de probetas, esquema planta del molde

3.2 Tipología de las probetas

El objetivo principal del proyecto es comprobar las ventajas que el vidrio le puede aportar a las construcciones con tapia desde el punto de vista mecánico. La adición del vidrio da lugar a dos tipologías de probetas distintas: probetas con vidrio y sin vidrio.

Ambos tipos de probetas son de forma prismática según el molde empleado con unas dimensiones de 300x100x100 mm y con un peso aproximado de unos 3 kg (Figura 3.3). Antes del proceso de fabricación se estimó entre ambos tipos de probetas una cierta diferencia a nivel visual en aquellas que tenían vidrio. Esto puede ser debido posiblemente a una diferente colocación de las partículas que conforman la mezcla durante el proceso de compactación y, en concreto, con una mayor influencia el vidrio grueso añadido, el cual cumple una función parecida a la grava.

Según se planificó, se realizaron un total de 58 probetas: 28 con vidrio y 30 sin vidrio (Tabla 3.1). La diferencia de dos probetas se debe a una ligera variación en la cantidad total empleada de cada material para obtener la mezcla. El objetivo es que a todas ellas se les realice tanto el ensayo mecánico a compresión como el ensayo de ultrasonidos.

Probetas	Con vidrio	Sin vidrio	Totales
	28	30	58

Tabla 3.1. Probetas con/sin vidrio

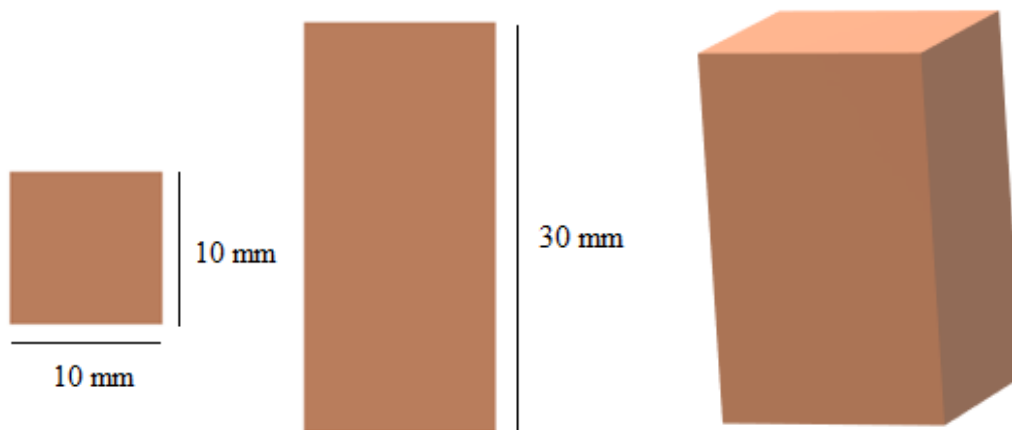


Figura 3.3. Representación 2D y 3D modelo probeta

3.3 Procedimiento de fabricación de las probetas

La fabricación de las probetas se llevó a cabo en dos tandas de trabajo a lo largo de dos semanas. En la primera semana se fabricaron las probetas con vidrio mientras que en la segunda semana las probetas sin vidrio. El primer paso del proceso establecido fue realizar la mezcla. A continuación, para ejecutar el proceso de fabricación se estructuró una cadena de trabajo organizada donde cada miembro del grupo realizaba una tarea con el objetivo de acelerar el proceso y aumentar la productividad. Las tareas a realizar fueron se muestran en la Figura 3.4.

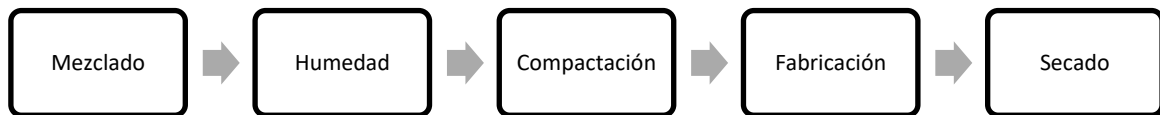


Figura 3.4. Procedimiento de fabricación

3.3.1 Mezclado de componentes

Entre las dos tandas de mezclado se estipuló una mezcla de un total de 200 kg: 100 kg para la mezcla con vidrio y 100 kg para la mezcla sin vidrio. Para agilizar el mezclado fue fundamental el uso de una mezcladora presente en el laboratorio, la cual optimizó considerablemente el proceso de fabricación y realizó un mezclado más homogéneo de los componentes en comparación con la mezcla manual. La grava, la arena fina y la arena gruesa se situaron de forma separada sobre una lona situada en el mismo laboratorio desde la cual se recogía la cantidad necesaria para el proceso de mezclado, mientras que la arcilla, la cal y el vidrio se facilitaron en distintos sacos (Figura 3.5).



Figura 3.5. Arcilla, limo, arena y grava empleados en la mezcla, Laboratorios ETSI

En primer lugar, se realizó la mezcla de 100 kg sin vidrio contando únicamente con arena gruesa, arena fina o lima y la grava (Tabla 3.2). Para agilizar el proceso de pesado y adición de los materiales a la mezcladora, se añadieron en dos tandas de 50 kg teniendo en cuenta los porcentajes de material indicados en la Tabla 2.6 mientras que el 5% de cal se obtiene sobre el total de mezcla añadida a la mezcladora en este caso los 50 kg. El tiempo de mezclado se estimó en unos cuatro minutos confirmando visual y manualmente que la mezcla había quedado homogénea.

Grava	Arena	Limo	Arcilla	Cal
15%	50%	20%	15%	5%
15 kg	50 kg	20 kg	15 kg	5 kg

Tabla 3.2. Pesos materiales añadidos 100 kg mezcla sin vidrio

Una vez estaban mezclados uniformemente los 100 kg sin vidrio, se procedió a separarlo en cuatro cubos de 25 kg etiquetados debidamente para su posterior identificación. La adición de agua no se realizaría hasta el momento previo al proceso de fabricación con el objetivo de contar con la cantidad de humedad óptima según se había comprobado en el ensayo Próctor. Esta humedad garantizaría la correcta compactación de las probetas en el molde así como el buen comportamiento de las probetas en el ensayo destructivo a compresión. De la misma forma, la adición de cal no se realizaría hasta justo antes de empezar a fabricar las probetas para evitar que esta comience a reaccionar antes de lo debido.

Seguidamente se realizó el mezclado de los 100 kg de mezcla con vidrio siguiendo el mismo procedimiento descrito para el caso sin vidrio (Tabla 3.2). Durante el proceso comprobamos que faltaba una pequeña cantidad de arcilla para llegar a los kg que había añadir de la misma. Para solventar el problema se tomó la decisión de continuar el mezclado con la arcilla disponible recalculando así las proporciones y tomando la cantidad de arcilla presente como referencia. Esto supuso que el total de la mezcla con vidrio fuese de 97,98 kg. Las cantidades añadidas siguieron lo establecido en la Tabla 3.3, pero al igual que en la mezcla sin vidrio, no se añadió la cantidad de agua y cal correspondiente.

Grava	Arena	Limo	Arcilla	Cal	Vidrio triturado (medio)	Vidrio sin triturar (grueso)
15%	50%	20%	15%	5%	35%	65%
14,698 kg	12,248 kg	4,899 kg	14,698 kg	4,899 kg	33,437 kg	18,005 kg

Tabla 3.3. Pesos materiales añadidos para 50 kg de mezcla

De forma paralela al proceso de mezclado se prepararon separadores de neopreno, los cuales cumplían la función de separar las probetas en el molde durante el proceso de fabricación. Estos separadores tienen unas dimensiones ligeramente inferiores a la sección de 100x100 mm de las probetas con el objetivo de que puedan extraerse fácilmente de cada columna del molde.

Durante todo el proceso de mezclado fue destacable el especial manejo de las cantidades de mezcla al pasarlas de los cubos a la mezcladora y viceversa. Esto se debía a la suspensión y pérdida de finos al cambiar la mezcla de recipientes por lo que se le prestó especial atención a su manejo, por la cantidad de veces que se realizó la operación lo que podría suponer una pérdida de finos considerables afectando así al total de la mezcla.

3.3.2 Humedad de fabricación

Los componentes de la mezcla se colocaron sobre una lona para evitar el exceso de humedad, pero al no ser una medida totalmente fiable para comenzar el proceso de fabricación, se realizó una medición de humedad previa a la adición de agua a la mezcla. La medición de humedad se realizó mediante el secado en el horno de varias muestras tomadas de la mezcla seca. Mediante este método no se obtenía el resultado de humedad de forma instantánea por lo que se planteó el secado de las muestras en una sartén (Figura 3.6). Aunque se obtienen los resultados de humedad mucho más rápido que mediante el secado en el horno, estos no eran del todo fiables. Al secarse la tierra, los finos se desprendían más fácilmente pudiendo así obtener resultados lejanos a la realidad ya que las muestras eran porcentajes pequeños del total de la mezcla y la pérdida de cualquier cantidad de material suponía llegar a unos resultados no válidos.



Figura 3.6. Medición humedad con sartén

Medición humedad en horno

Este procedimiento se basa en pesar las muestras extraídas antes de introducirlas en el horno y, al sacarlas, obtener la diferencia y el porcentaje de humedad presente en la mezcla para la fabricación. Este método se basa en la norma UNE 103-300:1993^[13], manteniéndose así las muestras en el horno durante 24 horas a 110 °C. Una vez cumplido el tiempo, se sacaron y se pesaron teniendo en cuenta el peso del recipiente empleado.

Esto permitió saber de qué porcentaje de humedad partía la mezcla seca, para así poder realizar el proceso de adición de agua de forma controlada con el objetivo de llegar al porcentaje de humedad óptima del 12%, el cual se obtuvo mediante la realización del Ensayo Próctor Normal. El resultado obtenido fue el mostrado en la Tabla 3.4.

Nº	Peso recipiente (kg)	Peso recipiente + Muestra húmeda (kg)	Peso recipiente + Mezcla seca (kg)	Mezcla húmedo (kg)	Mezcla seca (kg)	Agua (kg)	Humedad (%)
1	0,222	1,104	1,093	0,882	0,871	0,011	1,26
2	0,224	0,959	0,950	0,735	0,726	0,009	1,24
3	0,225	0,877	0,870	0,652	0,645	0,007	1,09
4	0,317	1,106	1,097	0,789	0,78	0,009	1,15
5	0,317	1,094	1,085	0,777	0,768	0,009	1,17

Tabla 3.4. Medida humedad mezcla seca sin vidrio

Se obtiene un porcentaje de humedad promedio del 1,18% para la mezcla seca antes del añadido de agua. El proceso de adición del agua en pequeñas cantidades se basaba en comprobar visualmente la consistencia y textura óptima de la mezcla para el proceso de compactación de las probetas. De esta manera, cuando se comprobaba que el estado de la mezcla con el añadido del agua era el adecuado, se comenzaba el proceso de fabricación de las probetas.

Tanto en la tanda de fabricación de las probetas con vidrio como de las probetas sin vidrio, se decide añadir los 100 kg a la mezcladora junto con la cal e ir añadiendo el agua en pequeños porcentajes durante el proceso de mezclado. Para el mezclado de la tierra con vidrio se añadieron los 100 kg directamente y surgió el inconveniente de que no se realizaba la operación de mezclado de forma homogénea ya que el conjunto de materiales con el agua añadida llevaba a la mezcladora a su límite de capacidad. Como solución se separaba del proceso un cubo de material en torno a los 20 kg de peso, el cual se añadía posteriormente y se volvía a sacar otro cubo de mezcla. Este proceso aligeró y mejoró el proceso de mezclado.

Teniendo en cuenta los problemas observados durante el proceso de mezclado de los 100 kg de la tierra con vidrio, en esta segunda tanda de fabricación de las probetas sin vidrio se optó por dividir los 100 kg de tierra en dos tandas de 50 kg cada una. Para ello hubo que recalcular el peso de cada material mediante los porcentajes ya definidos sobre un total de 50 kg. En las dos subtandas de 50 kg se realizó la misma operación: se añadió el material a la mezcladora, se añadió la cal para realizar una primera mezcla y, a continuación, se añadió el agua de forma progresiva en cantidades de 0,5 litros hasta llegar aproximadamente a los 4 litros correspondientes a los 50 kg de mezcla. Durante la adición del agua se comprobó que el mezclado de todo el material se realizó más rápida y homogéneamente que en el caso anterior.

Tanto en el proceso de adición de agua de la mezcla con vidrio como de la mezcla sin vidrio se comprobó que el grado de humedad óptimo a simple vista se situaba en torno al 8% de agua respecto al total de la mezcla. Para confirmar el grado de humedad de la mezcla con vidrio y sin vidrio justo antes del proceso de compactación y comprobar si este grado de humedad era cercano al obtenido como resultado del Ensayo Próctor Normal o efectivamente se situaba en torno al 8%, se midió para la mezcla de ambos tipos de probetas el porcentaje de humedad. Para ello, se tomaron cinco muestras tanto de la mezcla con vidrio como de la mezcla sin vidrio y se obtuvieron los porcentajes de humedad respectivos de cada una justo antes de comenzar el proceso de fabricación. Estas muestras se secaron en el horno durante 24 horas obteniendo los resultados mostrados en las Tablas 3.5-3.6.

Nº	Peso recipiente (kg)	Peso recipiente + Muestra húmeda (kg)	Peso recipiente + Mezcla seca (kg)	Mezcla húmedo (kg)	Mezcla seca (kg)	Agua (kg)	Humedad (%)
1	0,156	0,559	0,530	0,403	0,374	0,029	7,75
2	0,155	0,649	0,613	0,494	0,458	0,036	7,86
3	0,202	0,707	0,670	0,505	0,468	0,037	7,91
4	0,157	0,470	0,446	0,313	0,289	0,024	8,30
5	0,198	0,568	0,540	0,37	0,342	0,028	8,19

Tabla 3.5. Medida humedad mezcla fabricación con vidrio

Nº	Peso recipiente (kg)	Peso recipiente + Muestra húmeda (kg)	Peso recipiente + Mezcla seca (kg)	Mezcla húmedo (kg)	Mezcla seca (kg)	Agua (kg)	Humedad (%)
1	0,155	0,694	0,514	0,539	0,359	0,18	50,14
2	0,156	0,768	0,728	0,612	0,572	0,04	6,99
3	0,155	0,787	0,601	0,632	0,446	0,186	41,70
4	0,198	0,785	0,743	0,587	0,545	0,042	7,71
5	0,202	0,871	0,82	0,669	0,618	0,051	8,25

Tabla 3.6. Medida humedad mezcla fabricación sin vidrio

De los resultados obtenidos para mezcla de fabricación sin vidrio, se puede observar que el porcentaje en humedad para la muestra 1 y 3 no son válidos, por lo que no se han tenido en cuenta para el cálculo de la media. Esta tiene un valor del 7,65% lo que se acerca considerablemente al 8% considerado como grado de humedad adecuado a simple vista en el añadido de agua a ambos tipos de muestras. Por otro lado, para la mezcla de fabricación con vidrio se obtiene justamente un porcentaje de humedad del 8%. Por lo tanto, el contenido de humedad promedio con el que se realizó tanto la fabricación de las probetas con vidrio como sin vidrio está en torno al 8% lo que se aleja en un 4% respecto al valor óptimo de humedad obtenido por el Ensayo Próctor Normal.

3.3.3 Procedimiento de compactación

La compactación y fabricación de ambas tipologías de probetas fue el paso siguiente al añadido del agua para alcanzar la humedad óptima. Este proceso se dividió en dos días de trabajo con una semana aproximada de diferencia de tal forma que en la primera tanda se fabricaron las probetas con vidrio y en la segunda las probetas sin vidrio.

El desarrollo del proceso de fabricación pasaba por todos los miembros del grupo de trabajo cumpliendo cada uno una tarea. De todas ellas era de especial interés que la persona encargada de la compactación de las probetas en el molde siempre fuese la misma y, de esta forma, la carga aplicada en la compactación siempre sería la misma. Este proceso se llevó a cabo con un martillo percutor el cual facilitó y agilizó el proceso de compactación permitiendo fabricar todas las probetas estimadas en un mismo día de trabajo. Este martillo consistía en un brazo aplicado a la base y, situado sobre este brazo, se colocaba la pieza con la que se ejercía presión a la mezcla dentro del molde. Esta pieza tenía un forma cuadrada con una sección ligeramente más pequeña que la sección del hueco del molde para así posibilitar la entrada y salida del martillo.

La metodología de compactación estuvo definida por el tipo de molde disponible. Como se describió anteriormente, este se dividía en cuatro columnas las cuales permitían la fabricación de ocho probetas a dos alturas de forma simultánea. Se enumeraron los huecos del molde entre el 1 y el 4, lo que permitió organizar y enumerar las probetas según el hueco del molde en el que se habían fabricado así como facilitar su identificación en la realización de ensayos después del proceso de secado (Figura 3.7).

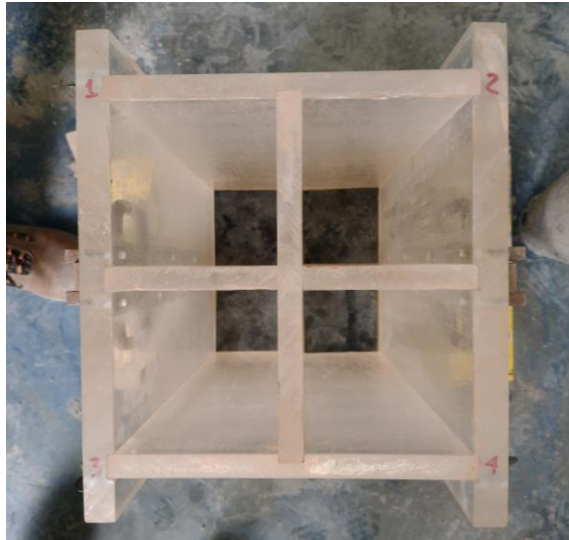


Figura 3.7. Identificación columnas compactación probetas

El proceso de compactación se realizaba según el orden marcado en los huecos colocando previamente una placa de metacrilato en la base antes de añadir la mezcla y así se facilitaba la operación de desmolde. Empezando por el primer hueco, se añadía una tongada de 1 kg de mezcla previamente pesada, se compactaba durante 10 segundos y se pasaba al siguiente hueco. Cada probeta constaba de tres tongadas de material por lo que cuando se había realizado el anterior proceso tres veces ya se habían compactado las cuatro primeras probetas. Antes de pasar a la compactación de las siguientes cuatro probetas se colocaba un separador de neopreno el cual permitía separar la probeta inferior y superior de un mismo hueco. A continuación, se realizaba la compactación de las cuatro probetas superiores volviendo a empezar por el primer hueco y terminando por el cuarto hueco empleando la misma metodología. De esta manera, una vez terminada la compactación de la parte superior, ya se habían producido las ocho probetas correspondientes a un molde (Figura 3.8). Por último, se añadía una tongada al final de cada columna que se compactaba para realizar pruebas de porosidad.

Una vez estaba el molde completo, este se llevaba a la zona de desmolde donde se iban a colocar las probetas para su posterior secado (Figura 3.9). Se desmoldaban identificándolas con: fecha de fabricación, con/sin vidrio, columna y molde precedente.

En la primera tanda de fabricación para las probetas con vidrio, se realizaron un total de 3 moldes completos y un cuarto molde, el cual no se completó por la falta de material. De todos ellos se obtuvieron un total de 28 probetas con vidrio y algunas adicionales, las cuales se dejaron para las pruebas con el instrumental de los ensayos o por si alguna de las probetas enumeradas sufría algún desperfecto. Para la fabricación de las probetas sin vidrio, se llevó a cabo la misma metodología que para las probetas con vidrio añadiendo igualmente tongadas de 1 kg compactadas durante 10 segundos. En este caso se realizaron también 3 moldes completos y un cuarto molde sin completar de los que se obtuvieron 30 probetas más algunas adicionales destinadas a la realización de pruebas. La diferencia en la cantidad total de mezcla con y sin vidrio referenciada en el punto 3.3.1 del presente proyecto se reflejó en una mayor cantidad de probetas sin vidrio.



Figura 3.8. Probetas compactadas en el molde



Figura 3.9. Probetas columna con vidrio (izquierda) y sin vidrio (derecha)

3.3.4 Secado

Por último, una vez se han compactado y desmoldado las probetas se procede a situarlas para su secado siendo este un proceso lento, el cual no se puede agilizar. Durante el secado, la mezcla va a perder el contenido en humedad que tenía justo antes de la fabricación de las probetas ganando así la resistencia y cohesión correspondientes. Estas cualidades mecánicas dependen mayormente del contenido de arcilla presente en las probetas.

Tanto las probetas sin vidrio como con vidrio se colocaron en unas cámaras situadas en el mismo laboratorio donde se habían fabricado buscando que estuviesen lo más resguardadas posibles de agentes externos tales como la lluvia o los cambios de temperatura. El objetivo es que la temperatura y humedad durante el secado de las probetas se mantengan lo más uniforme posible y sin grandes variaciones, por lo que para comprobar esos cambios a lo largo de los meses y poder asociarlo a los resultados obtenidos en los ensayos contábamos con un controlador de temperatura y humedad en estas salas.

El tiempo de secado se planteó con 30 días de diferencia desde el día de fabricación de cada uno de los dos tipos de probetas, las cuales se diferencian una semana por lo que las probetas se sacarían de las cámaras a los 30, 60, 90 y 120 días. En la Tabla 3.7 se plantean las fechas de ensayos propuestas antes de comenzar esta fase del proyecto. Finalmente estas fechas se modificaron durante el desarrollo de los ensayos debido a distintos inconvenientes quedando las edades reales de ensayo tal y como se muestran en la Tabla 4.1.

	Fabricación	30 días	60 días	90 días	120 días
Probetas CV	15/03/2022	14/04/2022	14/05/2022	13/06/2022	13/07/2022
Probetas SV	21/03/2022	20/04/2022	20/05/2022	19/06/2022	20/07/2022

Tabla 3.7. Fechas establecidas ensayos

El objetivo es ver como afecta el proceso de secado a la resistencia mecánica de la tapia y comprobar si esta aumenta conforme el tiempo de secado es mayor, así como la dispersión de la resistencia de cada una de las probetas ensayadas en esas fechas. Para facilitar la identificación de las probetas durante el periodo de secado así como para la realización de los ensayos se les incluye un código, el cual permite saber si la probeta tiene o no vidrio, el molde y la columna en la que se compactó así como si fue en la parte superior o inferior de la misma y la fecha de secado (Figura 3.10). Por lo tanto, este código viene definido por la posición de la probeta en el molde.

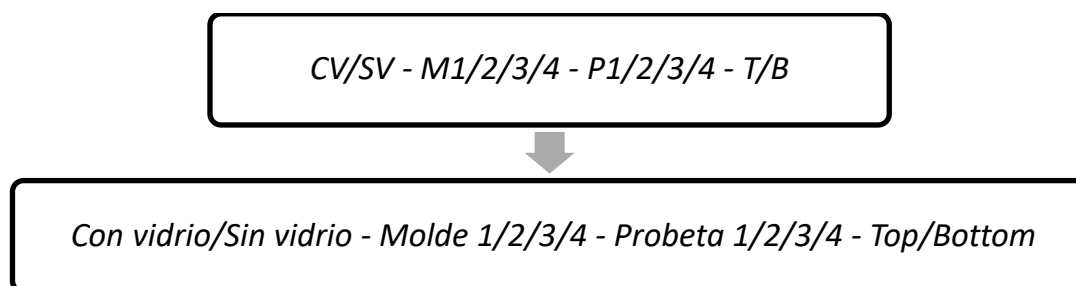


Figura 3.10. Descripción códigos probetas

Una vez ya se habían compactado las probetas sin vidrio, al compararlas con las probetas con vidrio apreciamos una diferencia notable en la apariencia externa de ambos tipos de probetas. Mientras que las probetas con vidrio tenían una textura más rugosa con algunos huecos apreciables a simple vista e incluso unos acabados más irregulares, las probetas sin vidrio eran más lisas y estéticas a simple vista (Figuras 3.11-3.12). Teniendo en cuenta que la granulometría es la misma y el porcentaje de humedad también, se puede atribuir este hecho a una distinta metodología de dosificación y mezclado de los componentes realizada para agilizar el trabajo de la mezcladora, medida que no se empleó para las probetas sin vidrio.



Figura 3.11. Secado probetas con vidrio



Figura 3.12. Secado probetas sin vidrio

3.4 Densidad y porosidad

En el proceso de fabricación, al terminar la compactación de las dos probetas correspondientes a cada hueco del molde, se compactaba una última tongada de 1 kg tal y como se puede observar en las imágenes de la página anterior. Todas estas porciones de material compactado se enviaron al laboratorio de Construcciones Arquitectónicas II de la ETS de Ingeniería de la Edificación en Sevilla donde se les realizaron pruebas de densidad y porosidad. El interés estaba en comprobar si la sustitución al 75% de la arena por el vidrio había modificado de forma notable o no la densidad de la mezcla así como la porosidad. Los resultados obtenidos se muestran las Figuras 3.13-3.16.

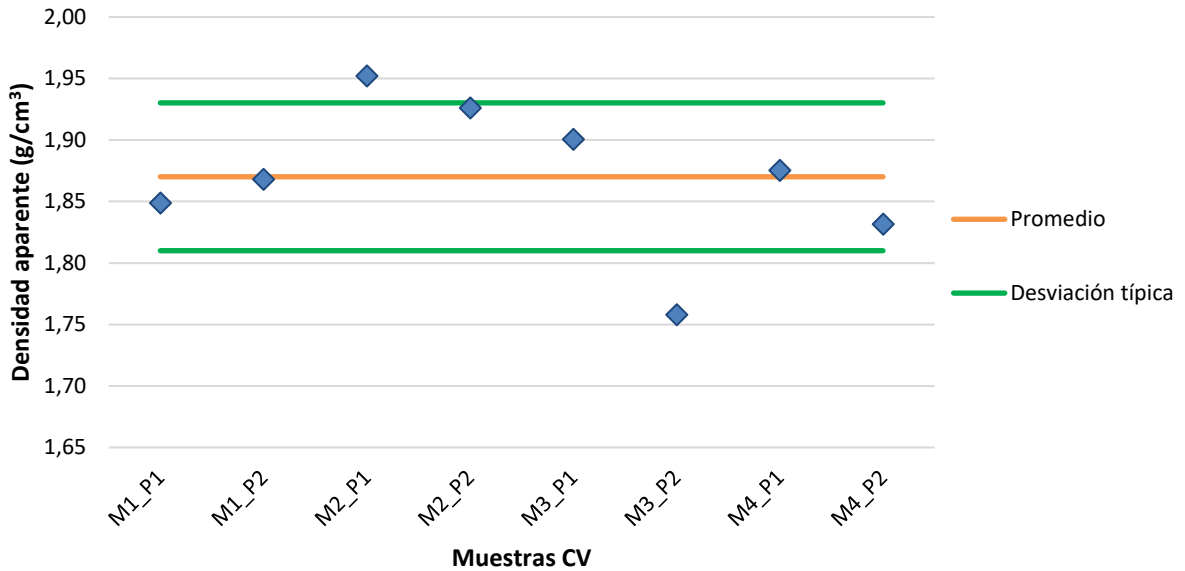


Figura 3.13. Densidad aparente probetas CV 90 días

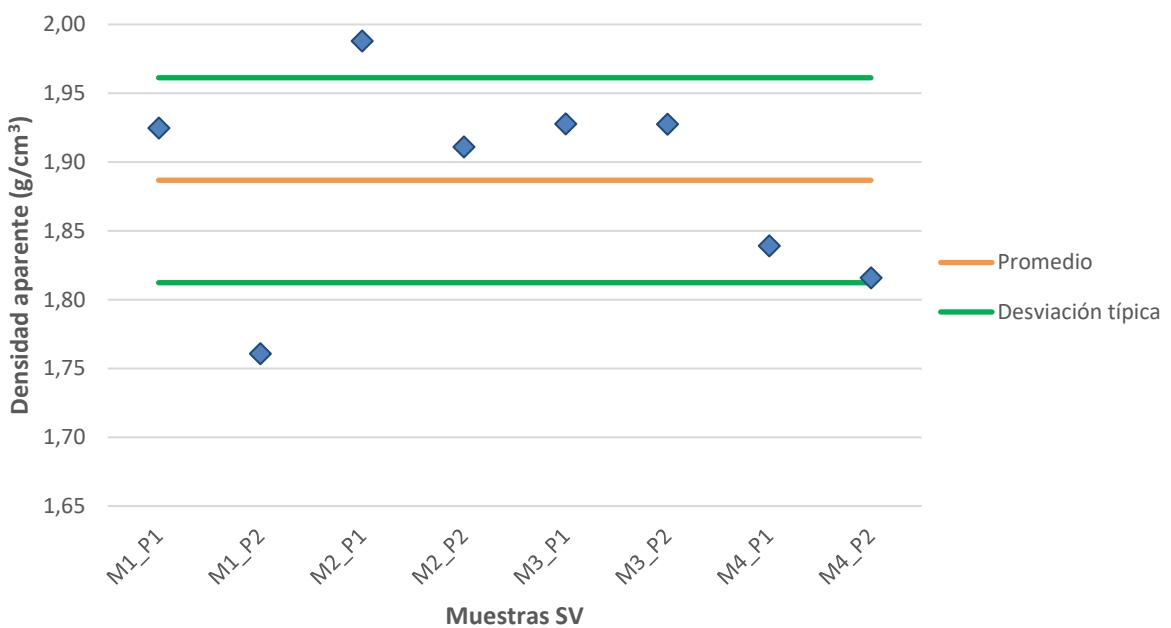


Figura 3.14. Densidad aparente probetas SV 90 días

Según los datos obtenidos, la densidad aparente promedio de las probetas con vidrio es de 1,87 g/cm³ mientras que para las probetas sin vidrio es de 1,89 g/cm³ por lo que son similares (Figura 3.13-3.14). Esta característica se relaciona con la velocidad de las ondas de tipo P, las cuales son ondas elásticas de tipo volumétricas que comprimen y dilatan el medio por el que se propagan alternadamente en la dirección de propagación. Estas atraviesan a las probetas de tal forma que a mayor densidad aparente, más rápida es la velocidad con la que las ondas se transfieren por las mismas siendo este aspecto tratado en el ensayo de ultrasonidos. Por otro lado, se observa una dispersión algo notable en ambas gráficas, las cuales están basadas en los resultados numéricos tabulados en el Anexo A del presente proyecto.

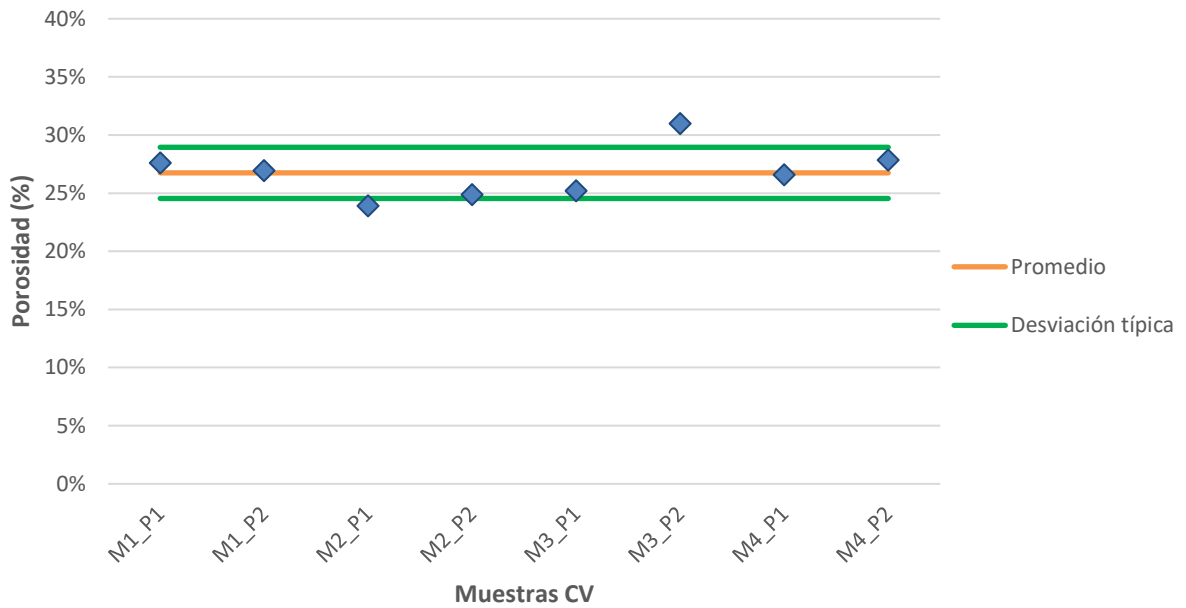


Figura 3.15. Porosidad probetas CV 90 días

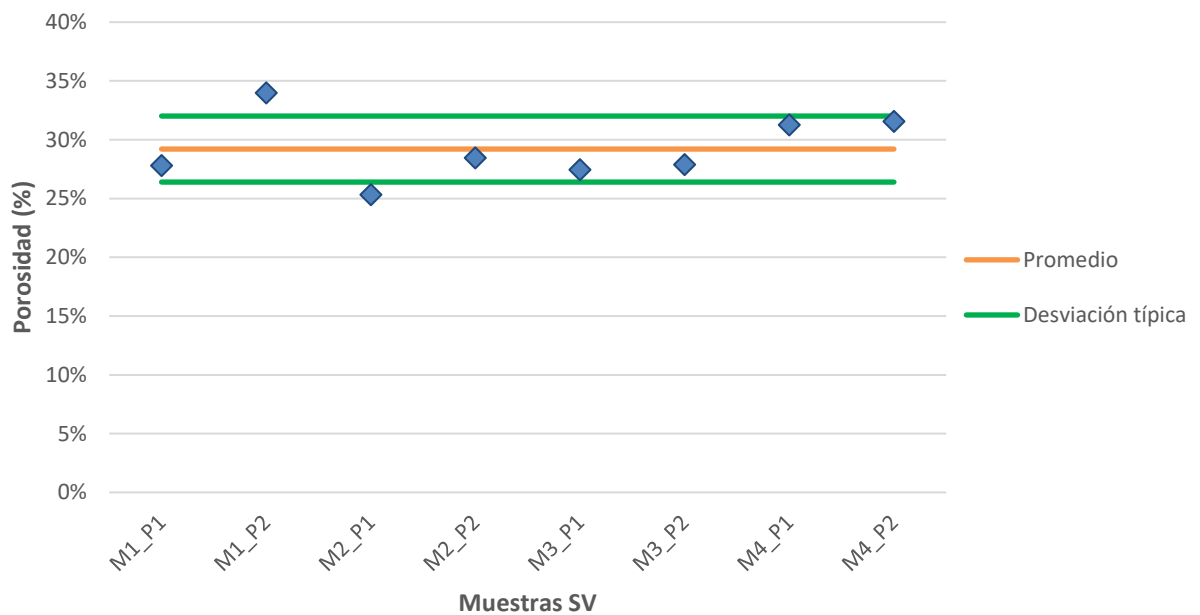


Figura 3.16. Porosidad probetas SV 90 días

En el caso de la porosidad, el promedio obtenido para las probetas con vidrio es del 26,74% mientras que para las probetas sin vidrio es del 29,21% (Figura 3.15-3.16). Si existe una mayor diferencia entre los promedios en la porosidad que en la densidad aparente así como la dispersión es menor en el caso de la porosidad. A la vista de los resultados para la densidad aparente, la porosidad debería ser algo superior para las probetas con vidrio, algo que no se cumple.

Por lo tanto, a pesar de la diferencia visual entre las probetas con vidrio y sin vidrio, ambos tipos tienen valores semejantes en densidad y porosidad. Debido a esto se puede confirmar que la diferencia visual no se debe a estos valores y que las probetas son similares.

4 ENSAYOS EXPERIMENTALES

Se realizaron dos tipos de ensayos tanto a las probetas con vidrio como sin vidrio: ensayo a compresión simple y ensayo de ultrasonidos. La realización de las tandas de ensayos venía determinada por los días de secado establecidos para cada conjunto de probetas, por lo que se llevaron a cabo un total de cuatro tandas de ensayos correspondientes a los 30, 60, 90 y 120 días de secado. En cada uno de esos tiempos marcados, en primer lugar, se llevaron a cabo los ensayos de las probetas con vidrio y, a continuación, de las probetas sin vidrio las cuales se ejecutaban con una semana de diferencia respetando los tiempos de fabricación. En cada una de las tandas se realizó primero el ensayo de ultrasonidos y posteriormente el ensayo mecánico a compresión, ensayándose un total de 58 probetas. Ambos ensayos se llevaron a cabo en el mismo laboratorio donde se fabricaron las probetas, el cual se encuentra en la ETSI de Sevilla. Las edades de las probetas en la realización de los ensayos se muestran en la Tabla 4.1.

Edad ensayo	Campaña de ensayo			
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
CV – Con vidrio	35 días	73 días	107 días	134 días
SV – Sin vidrio	32 días	73 días	102 días	129 días

Tabla 4.1. Fechas establecidas ensayos

Como se puede observar y tal y cómo quedó reflejado en el cronograma expuesto en el primer apartado del proyecto, por incompatibilidad de horarios y ciertos imprevistos no se pudieron ensayar las probetas justamente cada 30 días desde la fecha de fabricación aunque esto no supuso ningún problema para la obtención de los resultados buscados. La realización de los ensayos se realizó desde marzo hasta julio del presente así como la obtención y análisis de los resultados obtenidos.

4.1 Normativa de referencia

La normativa empleada para el ensayo a compresión simple es la UNE-EN-14580:2005^[14]. Mediante esta norma se pretende medir las deformaciones longitudinales de las probetas en dos estados distintos de cargas a compresión y así calcular el módulo de elasticidad estático.

Para la realización del ensayo, la norma especifica aspectos como: el equipo a usar, el mínimo de probetas a ensayar, las dimensiones de las probetas en función de su tipología y el procedimiento de ensayos entre algunos otros. Mediante este procedimiento se obtendrá la deformación medida sobre dos caras de las probetas en su dirección longitudinal y las tensiones a compresión alcanzadas en cada instante de tiempo, lo que permitirá obtener las gráficas tensión-deformación para las probetas con y sin vidrio en cada tanda de ensayos establecida. Las características mecánicas del material que se podrán obtener mediante la normativa empleada en el ensayo a compresión son:

- **Tensión – deformación**

A partir de las curvas de tensión – deformación de cada una de las probetas ensayadas se obtendrán la ley de comportamiento correspondiente clasificada según dos criterios: probetas con/sin vidrio y por la fecha de ensayo. Para obtener estos valores es necesario conocer la distancia longitudinal de la probeta así como la superficie sobre la que se aplica la carga a compresión.

$$\sigma = \frac{F}{A} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

- **Módulo de Young, E**

Para cada una de las edades indicadas se representarán distintas gráficas que reflejarán la ley de comportamiento de las probetas de tapia con y sin vidrio. Para el cálculo del módulo de elasticidad, algo que no se aborda en el presente proyecto, se tendría en cuenta el tramo lineal comprendido entre 1/3 f_c y 2/3 de f_c para establecer un mismo criterio de comparación dado el posible grado de no linealidad que pueda presentar la ley de comportamiento obtenida.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

- **Resistencia a compresión, f_c**

Este valor se obtendrá del máximo valor de tensión que soporta la probeta a compresión. El objetivo es determinar la evolución de los valores de resistencia a lo largo del tiempo en ambos tipos de probetas. A su vez, también se pretende demostrar si las probetas con vidrio junto con el tiempo de secado aportan una resistencia característica a compresión por encima de los valores obtenidos en las probetas sin vidrio, lo que confirmaría un mejor comportamiento a compresión para las construcciones de tapia con la inclusión de vidrio reciclado.

Por otro lado, para el ensayo de ultrasonidos, el objetivo es relacionar la velocidad de propagación de las ondas P con el módulo de elasticidad (E) obtenido de las curvas tensión-deformación y con la densidad del material (ρ). Para la realización de este ensayo se sigue la norma UNE-EN 12504-4:2006^[15].

4.2 Equipamiento ensayos

4.2.1 Ensayo de ultrasonidos

Para el ensayo de ultrasonidos se empleó un equipamiento basado en un sistema emisor-receptor a partir del cual, un software informático, representa gráficamente la velocidad de propagación de las ondas definiendo previamente una serie de parámetros. Este es el equipo Pundit Lab de la marca Proceq con el cual se llevaron a cabo los ensayos (Figura 4.1).



Figura 4.1. Equipo ensayo ultrasonidos

Los posibles ensayos con el equipo de ultrasonidos eran de tipo directo o indirecto. A su vez, dentro del ensayo directo se distinguen dos tipologías: ensayo tomográfico y ensayo directo.

- **Ensayo directo**

En este tipo de ensayo el emisor y receptor se sitúan en distintas caras pudiendo ser perpendiculares o paralelas entre ellas. Dentro del ensayo directo se distinguen dos subtipos:

- Ensayo tomográfico

Este consiste en situar el emisor en una de las caras longitudinales y el receptor en la cara opuesta. Permitía realizar un barrido más exhaustivo de la probeta por lo que se obtenían unos resultados más completos. El tiempo de realización del ensayo aumentaba considerablemente en el caso de usar esta técnica para todas las probetas empleando un total de treinta minutos en cada ensayo tomográfico. Por lo que se decidió emplearla únicamente para las dos probetas con menos imperfecciones a criterio visual de cada una de las tandas a ensayar.

Previamente se marcaron un total de cinco puntos en la dirección longitudinal de la probeta tanto en la cara X+ como en la X-, dividiéndolas en distintos tramos. En un lado se sitúa el emisor y en el lado opuesto el receptor, los cuales se sitúan en distintos puntos de la probeta según el diagrama de flujo indicado en el punto 4.3.1.

- Ensayo directo simple

En comparación con el ensayo tomográfico, el tiempo de realización de este tipo de ensayo era notablemente inferior. En este caso, el emisor y el receptor avanzaban paralelamente en cada una de las marcas señaladas en las probetas.

- **Ensayo indirecto**

En este caso, el emisor y receptor se encuentran en la misma cara. Este tipo de ensayo no se ejecutó en ninguna de las tandas realizadas.

Todos los ensayos de ultrasonidos realizados fueron de tipo directo.

4.2.2 Ensayo a compresión simple

En el desarrollo del ensayo a compresión simple se plantearon dos sistemas de medida de la deformación que tenía lugar en las probetas ensayadas: el sistema de vídeo extensometría y el extensómetro. El objetivo era medir el desplazamiento relativo de la probeta durante el ensayo a compresión recogiendo los valores de los parámetros destacados en la normativa descrita anteriormente. Ambos sistemas miden el desplazamiento relativo de la probeta sometida a compresión a través de una de las máquinas disponibles en el laboratorio de la ETSI de Sevilla (Figura 4.2).

Esta se encuentra conectada a un grupo hidráulico, el cual ejerce la presión deseada y permite el control del actuador. El control de esta máquina estaba programado según la normativa explicada, lo que permitía que el ensayo destructivo estuviese automatizado. Se controla desde un ordenador central externo a la misma, el cual está conectado a su vez con otras máquinas del laboratorio así como al grupo de presión. Esta se basa en un actuador que se puede desplazar verticalmente y que ejerce presión al material ensayado colocado sobre un plato fijo situado en la parte inferior de la misma. Teniendo en cuenta la forma prismática de las probetas y que la sección que iba a entrar en contacto con la máquina de ensayo era la de menor superficie, se colocaron dos platos en los puntos de contacto: uno en la terminación del actuador hidráulico y otro en la base.



Figura 4.2. Máquina hidráulica ensayo a compresión

Los dos tipos de sistemas planteados para el ensayo a compresión de las probetas son los siguientes:

- **Extensómetro**

Este consiste en un pequeño sistema de medición de contacto directo sobre la probeta, el cual se fija sobre la misma para medir el desplazamiento relativo durante el ensayo a compresión (Figura 4.3). El extensómetro resultó ser un sistema de medida invasivo para la probeta, ya que dependía del contacto con la misma mediante el empleo de cuerdas alrededor para su fijación lo que podía afectar a la deformación durante el ensayo. A su vez, también dispone de dos pequeñas cuchillas que se fijan en una de sus cuatro caras longitudinales.

Durante el proceso de configuración de los ensayos con las probetas de prueba, se llegó a la conclusión de que la utilización de ambos sistemas simultáneamente era inviable ya que el extensómetro dificultaba la medida del sistema de vídeo extensometría.



Figura 4.3. Extensómetro, ensayo a compresión simple

- **Sistema de vídeo extensometría**

Este sistema cuenta con dos cámaras las cuales miden el desplazamiento relativo en las caras laterales de las probetas y dos focos para mejorar la resolución de las cámaras durante el tiempo de medida. Este se configura mediante un software desde el ordenador central, con el cual trabajamos previamente a los ensayos para una mayor familiarización y así optimizar el tiempo empleado en las distintas tandas de ensayos. El sistema de medida mediante las cámaras depende de unos patrones, los cuales había que situar en las dos caras laterales de las probetas sobre las que se realizaban las medidas. Mediante estos patrones se medía el desplazamiento relativo de las probetas durante el ensayo a compresión y, para evitar el contacto con la probeta durante los ensayos, se pegaron los patrones mediante una pletina metálica (Figura 4.4-4.5).

Para la medida de los parámetros que nos interesaban del ensayo a compresión de las probetas tales como la deformación y la tensión, se empleó únicamente el sistema de vídeo extensometría. Aunque el extensómetro era ligeramente más preciso, la medida del desplazamiento mediante las cámaras respetaba más la integridad de las probetas, ya que no entraba en contacto con ellas.

En comparación con el extensómetro, este sistema no necesita estar en contacto con la probeta, por lo que permite la libre deformación de la misma durante la carga a compresión. Las probetas llegaban a desprender cierta cantidad de finos situados en las caras durante su manejo por lo que el uso de las cuerdas para la fijación del extensómetro erosionaba las aristas longitudinales del mismo.

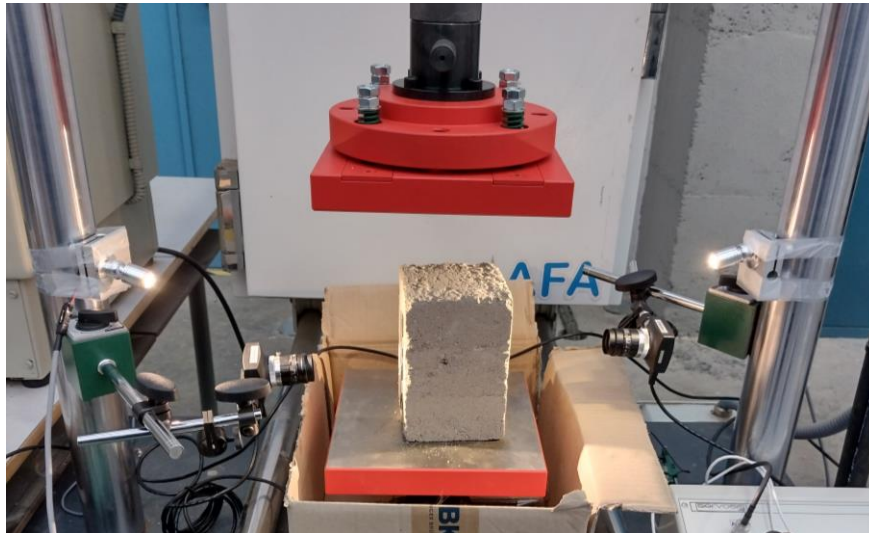


Figura 4.4. Sistema de videextensometría, ensayo a compresión simple



Figura 4.5. Sistema de videextensometría y extensómetro, ensayo a compresión simple

El equipamiento de vídeo extensometría era más compatible con la disposición de la máquina hidráulica que se iba a emplear y, a su vez, permitía la medición de la deformación relativa en dos caras opuestas de las probetas de forma simultánea mientras que mediante el extensómetro solo se podía medir en una de ellas. Este era un aspecto a tener en cuenta durante el proceso de deformación ya que al abandonar el estado elástico no todas las probetas se iban a deformar idealmente por todas sus caras, es decir, debido a las posibles irregularidades en la cara superior e inferior de contacto, esta deformación a compresión podría alcanzar un cierto estado de flexión debido al reparto de cargas de forma irregular por la probeta.

4.3 Configuración y preparación de los ensayos

En este apartado se explica el proceso de configuración y puesta a punto de los dos tipos de ensayos realizados a las probetas. La adaptación a la maquinaria de ensayo se realizó al final de la tanda de fabricación y antes de comenzar los respectivos ensayos, aunque durante el desarrollo de los mismos se realizaron algunas correcciones a las probetas cuyo resultado se reflejó en los resultados de resistencia a compresión obtenidos, los cuales se muestran en los siguientes apartados.

4.3.1 Ensayo de ultrasonidos

En primer lugar, se procedió a la calibración del ensayo de ultrasonidos. Como se ha mencionado anteriormente, mediante este ensayo se pretende medir la velocidad de propagación de una onda acústica generada por el equipo de ultrasonidos.

Uno de los parámetros a definir antes de comenzar este ensayo es la distancia entre las caras donde se sitúan el emisor y el receptor. El equipo permite realizar un análisis en tiempo mediante el cual se medirá el tiempo de propagación de las ondas y conociendo las dimensiones de la probeta, se obtiene la velocidad. En el caso de que se obtengan variaciones notables significará que existen posibles fallos o irregularidades en la probeta, lo que se verá reflejado probablemente en el ensayo destructivo con una menor resistencia característica a compresión. A la hora de calibrar el equipo de ensayos se pueden definir parámetros como: el número de pulsos, el intervalo de tiempo entre pulsos, el número de repeticiones y la distancia entre emisor y receptor.

Como se explicó anteriormente, se realizaron dos tipos de ensayos de ultrasonidos: el ensayo directo tomográfico y el ensayo directo simple. Para la ejecución de ambos, se siguieron unos patrones de actuación que se basaban en una serie de marcas situadas en las probetas tanto en las caras longitudinales como en la superior e inferior siendo la distancia entre estas marcas de 25 mm independientemente de la cara. También se tomó como referencia las marcas de los ejes X+ y X- mediante las cuales se dibujó el código identificativo en cada una de las probetas dejando el X- a la derecha y el X+ a la izquierda del mismo. A su vez, los ejes X+ y X- sirvieron para definir también los planos de actuación del emisor-receptor del equipo de ultrasonidos, a partir de los cuales se estableció la secuencia de los palpadores tanto en el ensayo tomográfico directo como en el ensayo directo simple.

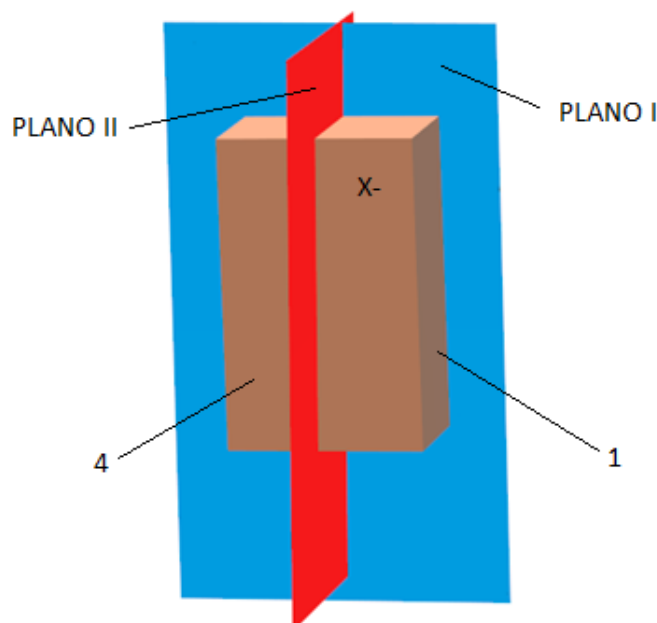


Figura 4.6. Planos y caras probeta, representación 3D

El procedimiento de actuación seguido tanto para el ensayo tomográfico como el directo, se basaba en una secuencia de movimiento que marcaba las posiciones del emisor y el receptor. El eje X es paralelo a la cara donde se sitúa el código identificativo de la probeta siendo el sentido negativo transversal a la cara 4, la cual está marcada en la Figura 4.6 y el positivo en el sentido opuesto. Transversalmente se encuentra el eje Y siendo su sentido negativo transversal a la cara 1, donde se sitúa la matrícula, mientras que el positivo se encuentra en el sentido opuesto. La cara 2 de la probeta es paralela a la 4 mientras que la cara 3 es paralela a la cara 1 según la Figura 3.2.

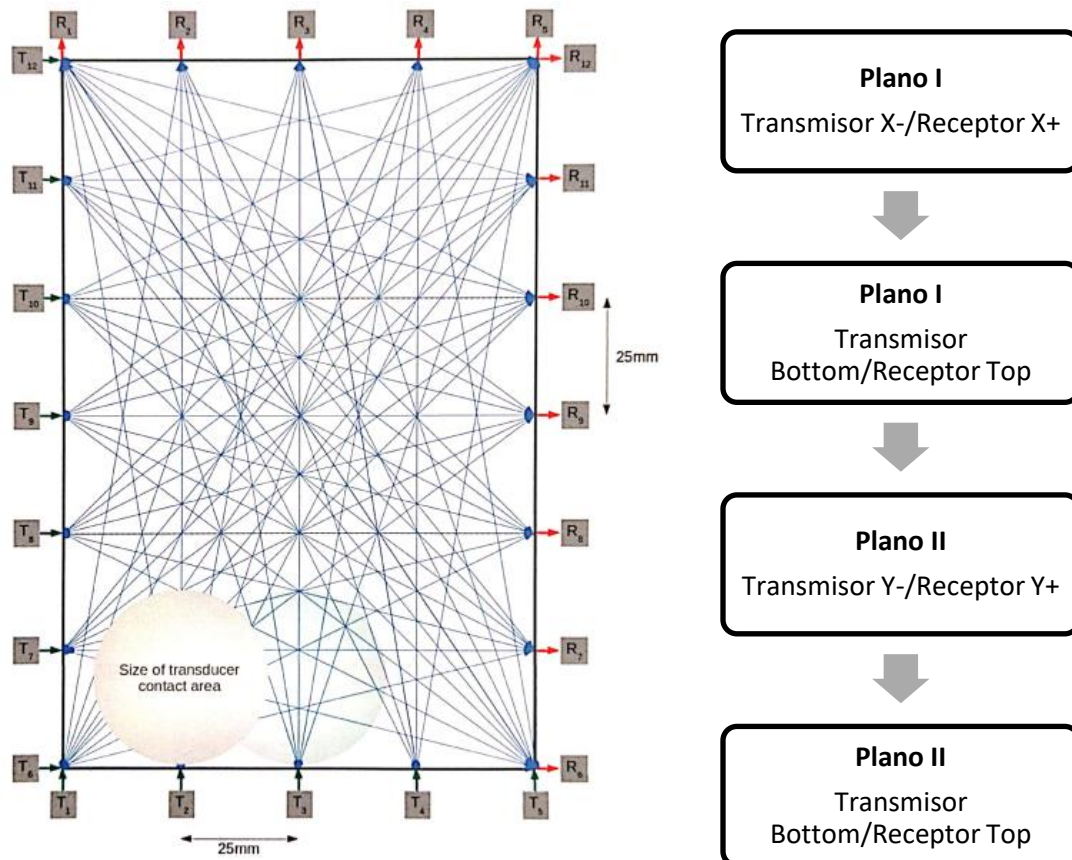


Figura 4.7. Esquema actuación ensayo ultrasonidos

A partir de la figura 4.7 se secuenció el procedimiento de actuación para los ensayos de ultrasonidos. En el superior izquierdo se indican los puntos donde se situó el transmisor comprendidos entre el 6 y el 12 para la dirección longitudinal por la cara X-/Y- mientras que el receptor se situaba entre el 6 y el 12 en la dirección longitudinal por la cara X+/Y+. Para la dirección transversal el transmisor se situaba en la parte inferior de la probeta del 1 al 5 mientras que el receptor en la parte superior también del 1 al 5. Por otro lado, en el esquema derecho se muestra la secuencia de actuación según la posición del transmisor y del receptor, pero tomando como referencia los planos donde estos se encontraban.

Aunque los esquemas anteriores eran comunes para los dos tipos de ensayos de ultrasonidos realizados, como se ha mencionado anteriormente, la secuencia no era la misma. A continuación, se muestra el avance de la posición del transmisor (T) y del receptor (R) siguiendo la numeración mostrada en la figura anterior, la posición donde se encuentran en el plano I y el plano II y el tipo de ensayo de ultrasonidos realizado mediante el diagrama de flujo de la Figura 4.8.

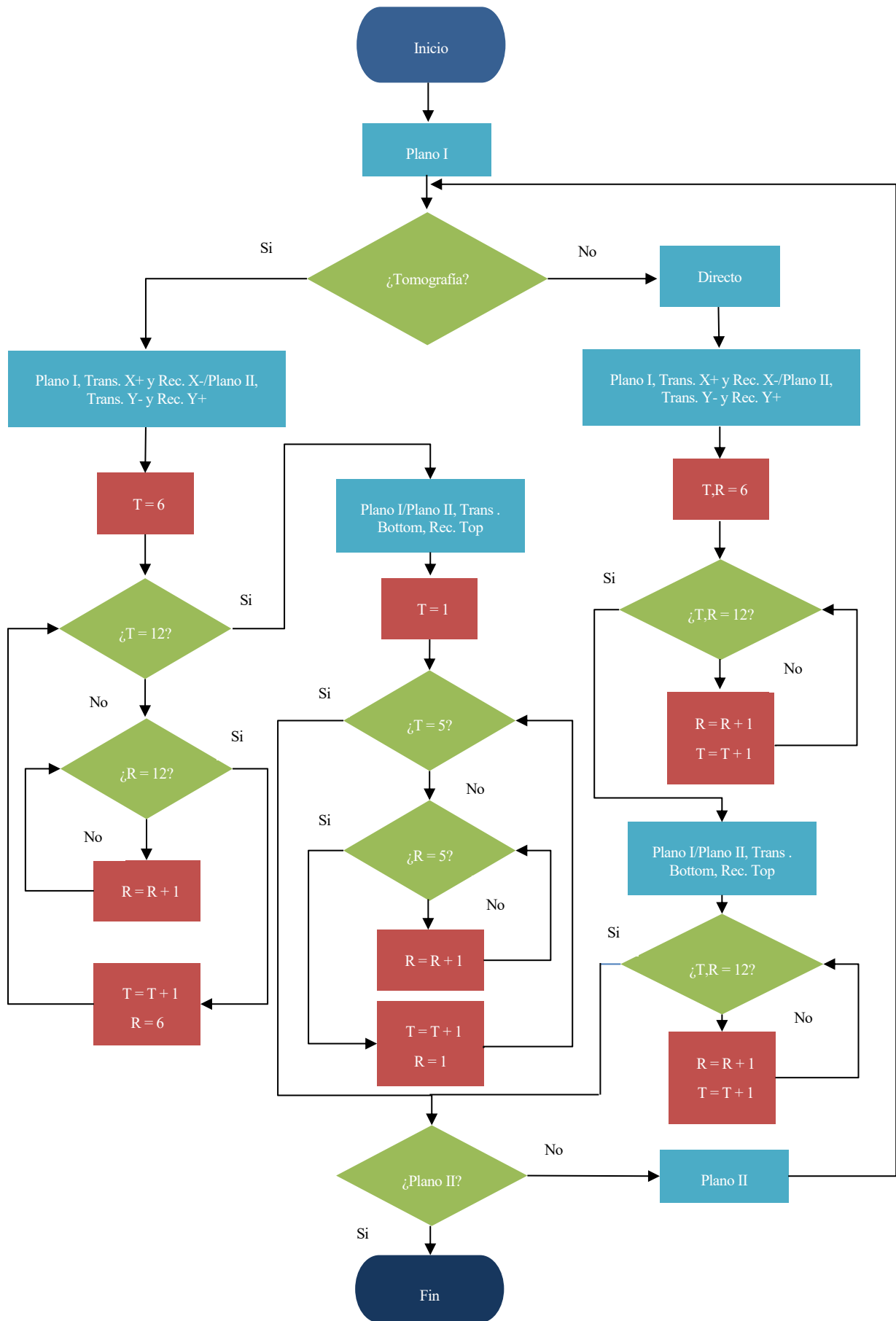


Figura 4.8. Diagrama de flujo procedimiento ensayo de ultrasonidos

En el diagrama de flujo mostrado anteriormente cada incremento del valor de T (Transmisor) y R (Receptor) es un movimiento de cada uno de los cabezales empleados para el ensayo de ultrasonidos. Se puede comprobar de esta manera, que el ensayo tomográfico lleva mayor tiempo y, a su vez, es más exhaustivo mientras que el ensayo directo es más rápido, pero aporta menos resultados.

El procedimiento de obtención y análisis de los resultados de los ensayos de ultrasonidos fue llevado a cabo por mi compañero en el presente proyecto, estudiante del Máster en Diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, Joseba García Román [8]. Debido a esto, en el punto 5 del presente proyecto únicamente se mostrarán los resultados del ensayo a compresión simple.

4.3.2 Ensayo a compresión simple

La realización de este ensayo permitirá obtener las curvas tensión-deformación tanto de las probetas con vidrio como sin vidrio, así como la resistencia característica a compresión a distintas edades de secado. A su vez, según el procedimiento descrito en la normativa de referencia para este ensayo, se podrá calcular el módulo de elasticidad y relacionarlo con los resultados del ensayo de ultrasonidos.

4.3.2.1 Medición de deformaciones

En concreto, durante el ensayo a compresión simple, se midió el desplazamiento relativo de las pletinas pegadas sobre los lados de las probetas enfocados por las cámaras del sistema de vídeo extensometría. Sobre las pletinas se pegaron los patrones que identifican las cámaras, los cuales deben tener las dimensiones apropiadas según su distancia a las mismas. Mediante la realización de varias pruebas se llegó a la conclusión que la distancia apropiada entre los patrones tarados a 5 mm y las cámaras debía ser de unos 10 cm (Figura 4.9). Estos patrones se situaron en la parte intermedia de las probetas disminuyendo así la posibilidad de que surgiesen fallos locales por deformación durante el ensayo, los cuales perjudicasen la medida de la deformación relativa por parte de las cámaras.



Figura 4.9. Patrón tarado en 5 mm sobre pletina metálica

Antes de la realización de los ensayos se llevaba a cabo la calibración del sistema de vídeo extensometría mediante el ajuste de las cámaras y de los parámetros relativos a ellas controlados por el software informático. Se debían controlar parámetros como: el tarado, la superficie máxima y mínima reconocida por el sistema y la relación de aspecto máxima y mínima. Con la calibración de estos factores, el sistema reconoce el patrón situado en las probetas y da una primera medida de la distancia entre ambas pletinas situadas en ambas caras de la probeta que se pretende ensayar (Figura 4.10). A partir de esta medida, cualquier diferencia entre los patrones es reconocida por el sistema y mostrada por pantalla en tiempo real, así como registrada en los datos almacenados sobre el ensayo.

Los datos registrados y guardados en tiempo real durante la realización del ensayo a cada una de las probetas son: el tiempo (s) registrado cada 0.5 segundos, la fuerza (kN) ejercida por el actuador, la posición (mm) del actuador, la deformación (mm) medida por la cámara 1 y por la cámara 2, el día y la hora.

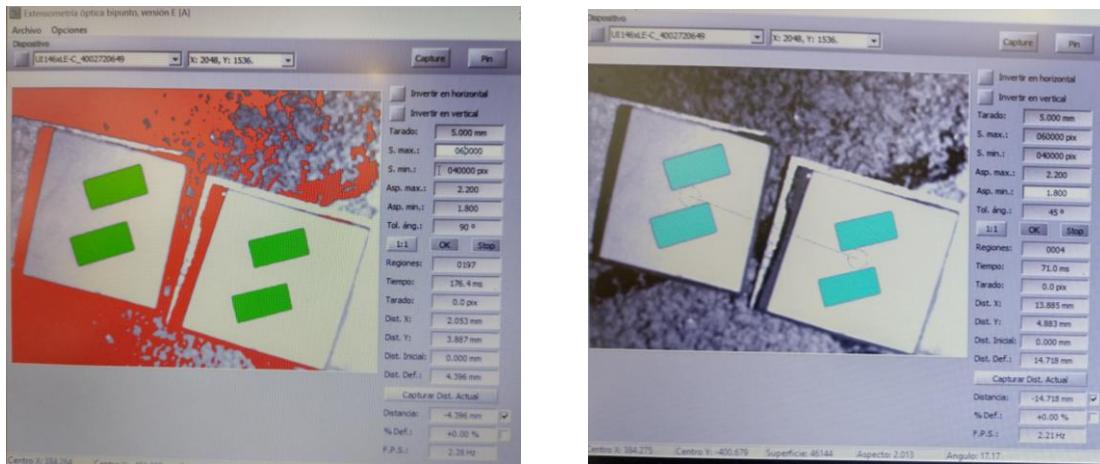


Figura 4.10. Calibración sistema vídeo extensometría

4.3.2.2 Ciclos de carga

El proceso del actuador se basa en cargar y descargar las probetas mediante unos ciclos de carga midiendo la deformación y la tensión respectiva durante todo el proceso. El ciclo de carga ejercido por el actuador se programó siguiendo la normativa de referencia señalada en el apartado 4.1. Las probetas ensayadas estuvieron controladas en desplazamiento en vez de un control en fuerza. En este caso la máquina busca la fuerza programada por encima del estado de la probeta, lo que por otro lado, podría ser un error fatal si la programación del actuador no fuese la correcta.

Antes de comenzar el ensayo se posicionaba el actuador a través del programa lo más pegado posible a la parte superior de la probeta. Para reducir la fricción durante los ensayos a compresión y evitar el fenómeno de confinamiento de las probetas durante el aumento de la carga a compresión, el cual pueda afectar a las propiedades mecánicas de las probetas se colocaron unas láminas de teflón de unos 5 mm de espesor con una sección algo superior a las mismas. El ensayo consta de un total de cuatro tramos diferenciados (Figura 4.11).

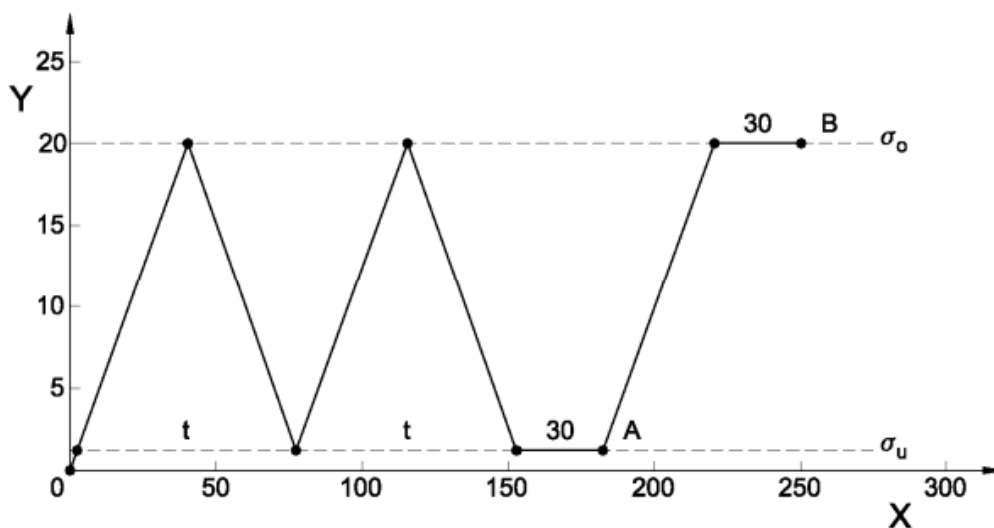


Figura 4.11. Gráfica X(tiempo, s)-Y(tensión, MPa) ciclos de carga, Ensayo a compresión simple

A partir de la norma UNE-EN-14580:2005^[14] y teniendo en cuenta a la tapia como material ensayado, se plantea como resistencia última (f_u) 1 MPa. Con esta resistencia y la sección de las probetas que se van a ensayar se obtienen las cargas al 2% y al 20% respecto a la resistencia última considerada necesarias para definir los ciclos de carga indicadas en la Figura 4.11.

- **Tramo 1**

El actuador ejerce una fuerza a compresión la cual aumenta a una velocidad de 1 mm/min hasta llegar a los 2 kN correspondientes al 20% de la resistencia última (f_u) considerada. A partir de este valor inicia una descompresión a la misma velocidad hasta llegar a los 0,2 kN como 2% de la resistencia última (f_u).

- **Tramo 2**

El segundo ciclo de carga es semejante al primero. Mediante estos dos primeros ciclos de carga se busca el asentamiento de la probeta. Este proceso permite adaptar a la probeta a la carga realizada llevando así a que se puedan distribuir uniformemente durante el proceso de compresión posterior.

- **Tramo 3**

No se realiza carga alguna durante 30 segundos.

- **Tramo 4**

Aumento de la carga a compresión hasta punto de rotura.

4.3.2.3 Refrentado de probetas

Como se ha explicado anteriormente, todo el proceso de compactación de las probetas lo llevó a cabo una misma persona con el objetivo de la carga aplicada a través del martillo percutor fuese lo más semejante posible durante toda la fabricación. Conforme se fueron secando las probetas se observaron una serie de irregularidades en la parte superior e inferior de algunas probetas donde se apreciaba una cierta pendiente. Esta pendiente era más notable en la parte superior de las probetas y, en concreto, de algunas de las probetas que se habían compactado en la parte superior del molde.

Por lo tanto, teniendo en cuenta el trabajo realizado por la persona que realizó la tarea de compactación, se llegó a la conclusión de que esta tarea se dificultaba gradualmente conforme se iban añadiendo tongadas en cada uno de los huecos del molde. Cada tongada suponía unos 10 cm de altura lo que hacía que la colocación del martillo percutor no fuese totalmente perpendicular a la superficie de la tierra añadida y esto se traducía en una cierta pendiente en las últimas tongadas de tierra de las probetas superiores (Figura 4.12).



Figura 4.12. Probeta 30 días sin refrentar, Ensayo a compresión simple

Como se puede comprobar en la imagen anterior para una probeta ensayada a los 30 días de secado, la pendiente de la parte superior hacia la cara X+ de la probeta es muy notable. Durante la realización de los ensayos a 30 días de secado, se llegó a la conclusión de que estas debido a estas pendientes en algunas de las probetas no se estuviesen obteniendo los resultados verdaderamente buscados que se obtendrían en el caso de que no presentasen esta imperfección. Por todo ello, para los ensayos a 60, 90 y 120 días de secado, se llevó a cabo el refrentado de las probetas tanto por la parte superior como por la inferior.

La ejecución de esta tarea fue guiada por varios profesores del departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de Sevilla. Mediante la operación del refrentado se pretendía corregir la posible pendiente y algunas imperfecciones en la cara superior e inferior de las probetas como la erosión de las esquinas, las cuales eran sensibles a la manipulación de las probetas. Este proceso no suponía un tiempo añadido a la realización de los ensayos. Este consistía en la mezcla de yeso y agua buscando una consistencia suficiente para realizar la corrección de la pendiente mediante un nivelador de burbuja. La ejecución de la tarea debía ejecutarse lo más rápidamente posible ya que la mezcla se secaba con rapidez. Esta se dejaba secar sobre una superficie plana y se retiraba con facilidad debido a la adición de aceite en la zona antes del proceso de refrentado (Figura 4.13).

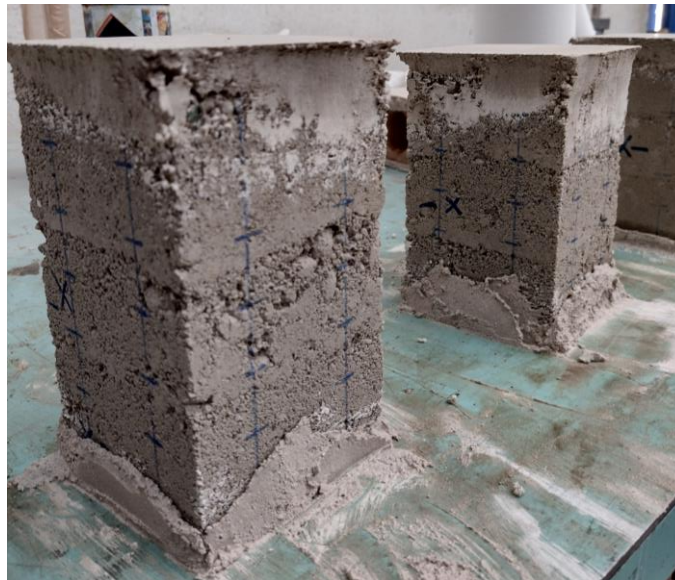


Figura 4.13. Probetas 90 días refrentadas, Proceso de refrentado

De este proceso se espera que puedan aumentar los resultados obtenidos de resistencia característica a compresión a 30 días tanto para los probetas con vidrio como sin vidrio, los cuales se muestran posteriormente. A su vez, también puede influir en la forma de romper de las probeta ya que la distribución de las cargas va a ser distinta.

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL ENSAYO MECÁNICO

Una vez se definieron los aspectos relativos a la maquinaria de ensayo así como los procedimientos que se iban a llevar a cabo, se procedió a la realización de los ensayos. Como se ha comprobado anteriormente, las dos tipologías de probetas fabricadas fueron sometidas a dos tipos de ensayo: el ensayo a compresión simple y el ensayo de ultrasonidos. Aunque la realización de los ensayos se llevó a cabo de forma conjunta, los resultados del ensayo de ultrasonidos y el análisis de los mismos quedan fuera del presente proyecto, los cuales fueron llevados a cabo por mi compañero, Joseba García Román.^[8]

En este punto se explicarán los resultados obtenidos para el ensayo destructivo relacionándolos con distintos aspectos del proceso tales como la compactación de las probetas, su granulometría o el refrentado entre otros. Estos resultados se pretenden contrastar entre las distintas edades de secado de las probetas donde habrá que tener en cuenta el efecto de la edad, la carbonatación de la cal aplicada y las condiciones de humedad y temperatura en las cámaras de secado. En la Tabla 5.1 se muestra el número de probetas ensayadas de cada tipología así como el número total por cada fecha de ensayo:

Días de secado/Fecha de ensayos	Probetas		
	Con vidrio	Sin vidrio	Total
30 días	7	7	14
60 días	8	8	16
90 días	7	8	15
120 días	6	7	13

Tabla 5.1. Número de probetas ensayadas a compresión para cada fecha de ensayo

5.1 Resistencia a compresión simple

En términos de resistencia, con el desarrollo de los ensayos destructivos a distintos días de secado desde el proceso de fabricación, se pretende comprobar si la presencia del vidrio junto con la cal en las probetas de tapia aumenta la resistencia de las mismas o, por el contrario, no tiene una influencia significativa. A su vez, también se espera relacionar los resultados obtenidos en resistencia con el tipo de rotura de las probetas visto en el punto anterior.

La obtención y procesamiento de los resultados de resistencia obtenidos en los ensayos fue llevado a cabo por mi compañero de proyecto, Joseba García Román. Como parte fundamental del ensayo a compresión simple y del presente proyecto, en este punto se mostrarán la resistencia a compresión simple (f_c) obtenida en cada fecha de secado. El objetivo es relacionar los resultados con la presencia del vidrio, con la cal, con las condiciones de humedad y temperatura en las cámaras donde se han secado las probetas, con el refrentado, la fabricación y granulometría de las probetas, en definitiva, esta es una forma de comprobar como afecta cada una de las variables mencionadas a la resistencia a compresión simple. En cada una de ellas se distinguirá entre probetas con y sin vidrio y se obtendrán los valores promedio y la desviación típica. En el Anexo B se muestran las tablas de valores a partir de las cuales se han representado las gráficas que se muestran en este punto.

5.1.1 Probetas 30 días

Los resultados para las probetas con y sin vidrio a 30 días de secado fue un primer paso en la presente investigación, los cuales no se podían comparar con ningún tipo de resultado, pero si se puede observar la dispersión y el promedio de las resistencias obtenidas así como la resistencia a compresión simple (f_c) para las probetas con vidrio y sin vidrio (Figura 5.1-5.3).

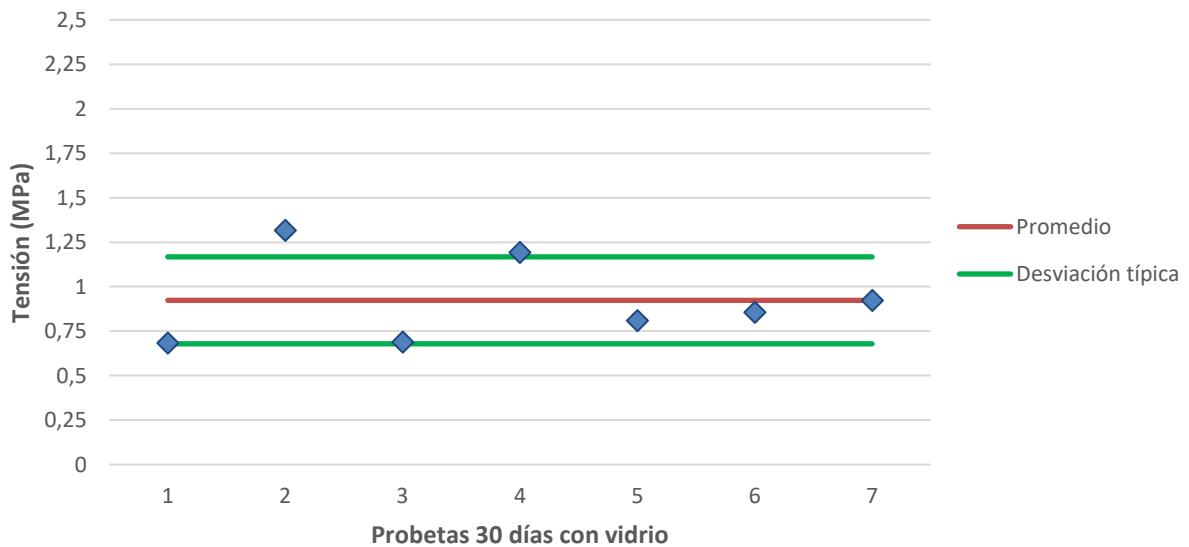


Figura 5.1. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 30 días con vidrio

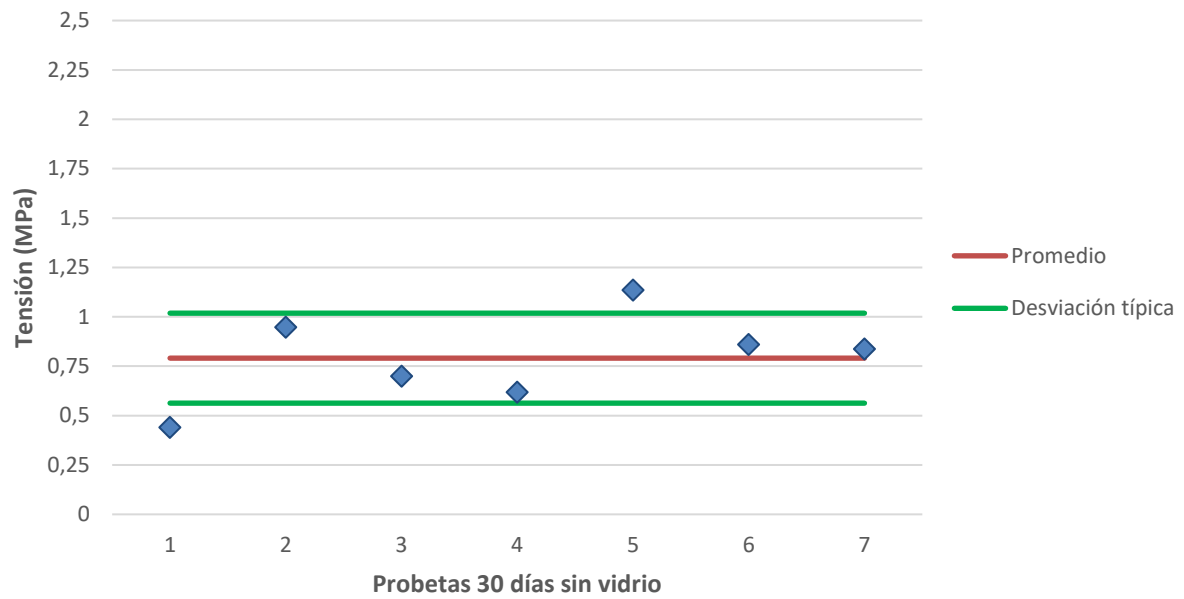


Figura 5.2. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 30 días sin vidrio

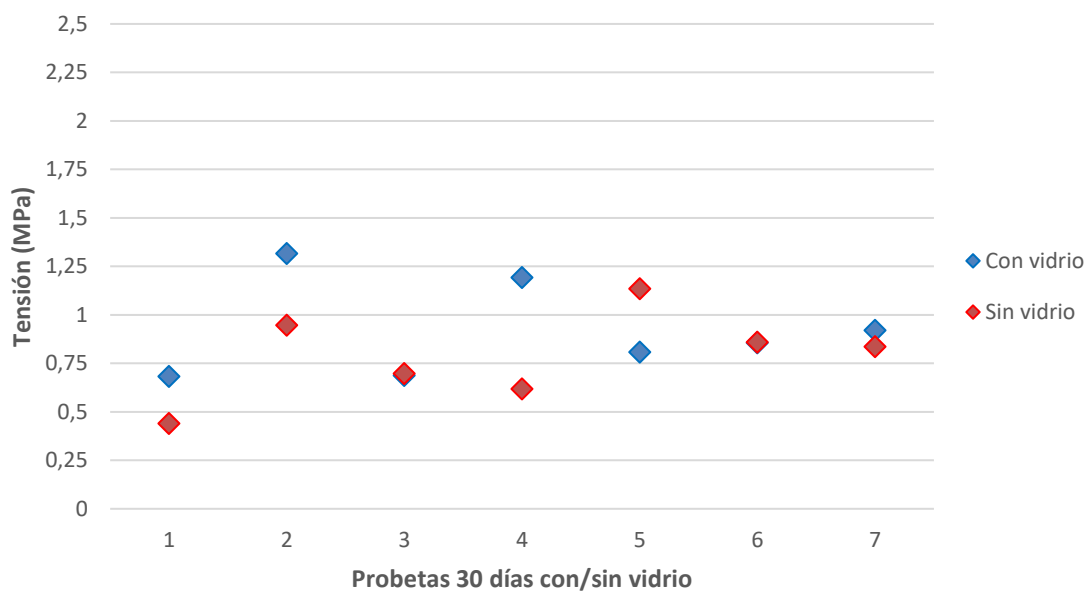


Figura 5.3. Gráfica resistencia a compresión probetas 30 días con vidrio/sin vidrio

A partir de los resultados obtenidos en las Figuras 5.1-5.3 y de los datos numéricos mostrados en el Anexo B del proyecto, se puede observar que las probetas con vidrio presentan una resistencia a compresión media ligeramente superior a las probetas sin vidrio aunque la dispersión es semejante. Estos resultados se compararán con los resultados obtenidos para las probetas a los 60 días con el objetivo de comprobar la influencia del refrentado y observar el tipo de rotura como consecuencia de las pendientes de algunas probetas en la cara superior. La resistencia característica y desviación típica a los 30 días de secado se muestran en la Tabla 5.2.

PROBETAS 30 DÍAS	Con vidrio	Sin vidrio
Resistencia característica	1,316 MPa	1,135 MPa
Desviación típica	0,244	0,228

Tabla 5.2. Resistencia característica y desviación típica, probetas 30 días

5.1.2 Probetas 60 días

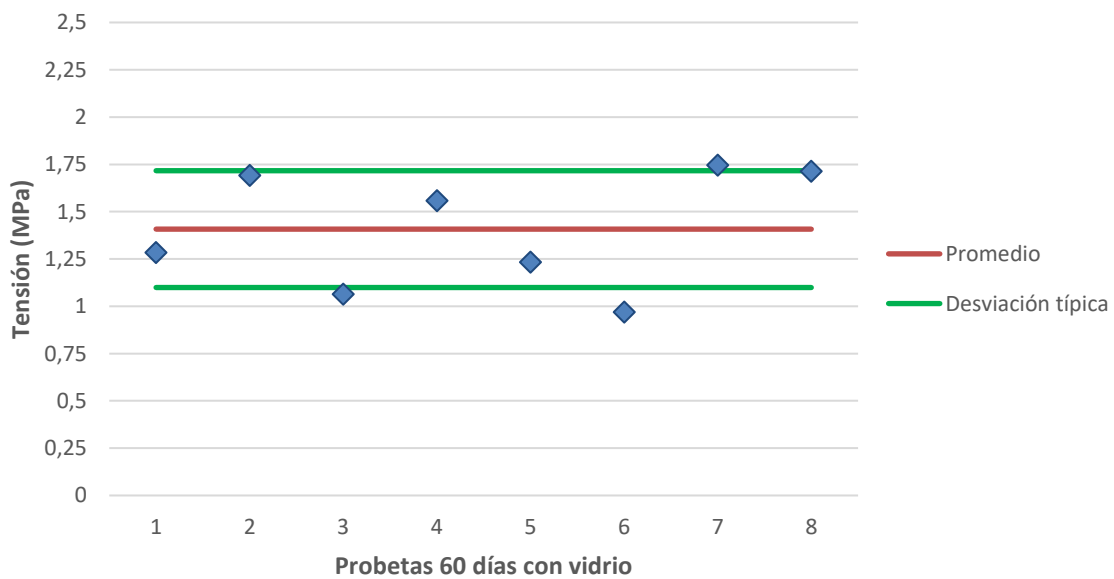


Figura 5.4. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 60 días con vidrio

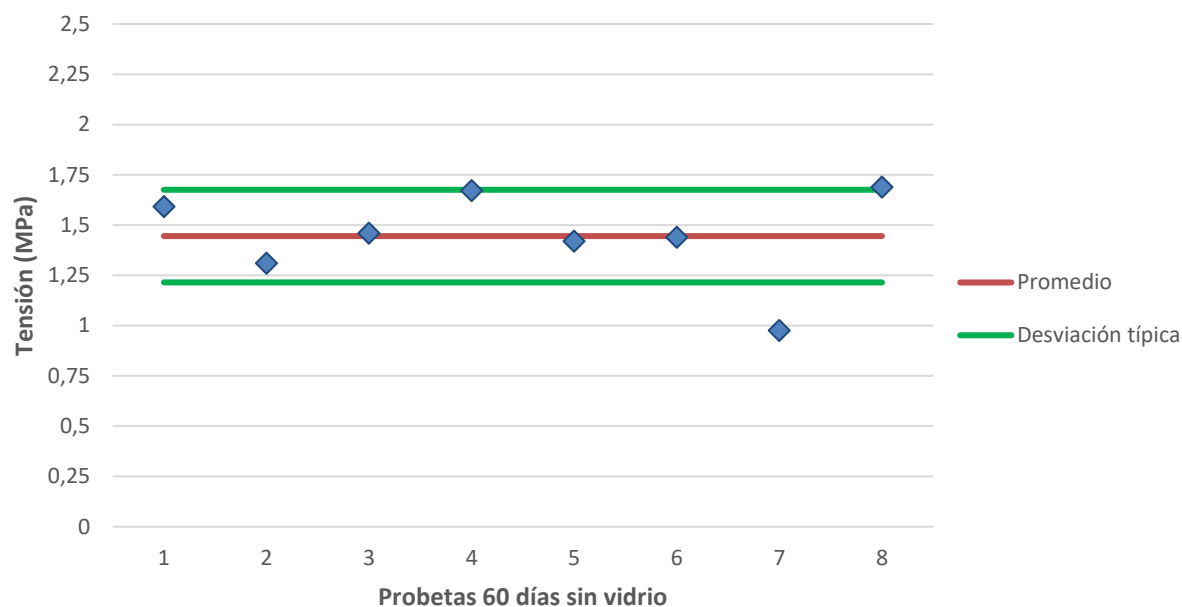


Figura 5.5. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 60 días sin vidrio

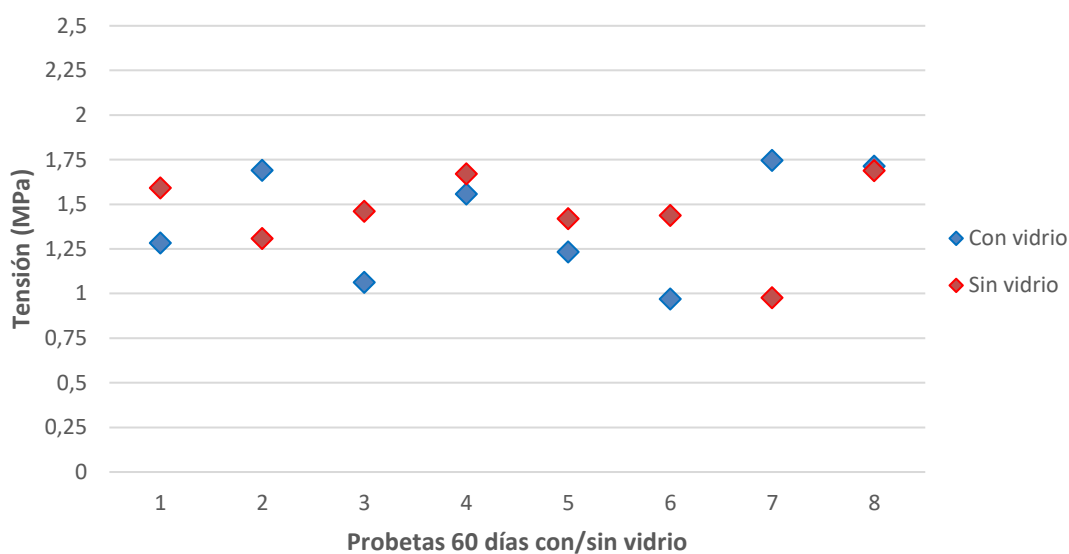


Figura 5.6. Gráfica resistencia a compresión probetas 60 días con vidrio-sin vidrio

A partir de los resultados representados en las Figuras 5.4-5.6 y tabulados en el Anexo B, se puede confirmar el incremento significativo de la resistencia media obtenida tanto para las probetas con vidrio como las probetas sin vidrio. A su vez, también ha aumentado la dispersión de los resultados sobre todo para las probetas con vidrio de los 30 a los 60 días de secado. Aún sin llegar a los resultados obtenidos a los 90 y 120 días, se relaciona este incremento generalizado de la resistencia con el mayor secado de las probetas y con la operación del refrentado para corregir la pendiente que mostraban muchas probetas de las ensayadas en la cara superior.

A su vez, como consecuencia de la corrección de la pendiente que mostraban algunas de las probetas en la cara superior, se puede confirmar para las probetas ensayadas a los 60 días que se ha estabilizado la forma de romper teniendo como consecuencia este hecho el aumento de la resistencia a compresión. En el caso de que para los 90 días el aumento de la resistencia no sea significativo, se comprenderá que este suceso ha sido en mayor medida debido al refrentado de las probetas que al proceso de curado. La resistencia característica y desviación típica para las probetas a 60 días de secado se muestran en la Tabla 5.3.

PROBETAS 60 DÍAS	Con vidrio	Sin vidrio
Resistencia característica	1,746 MPa	1,69 MPa
Desviación típica	0,309	0,231

Tabla 5.3. Resistencia característica y desviación típica, probetas 60 días

5.1.3 Probetas 90 días

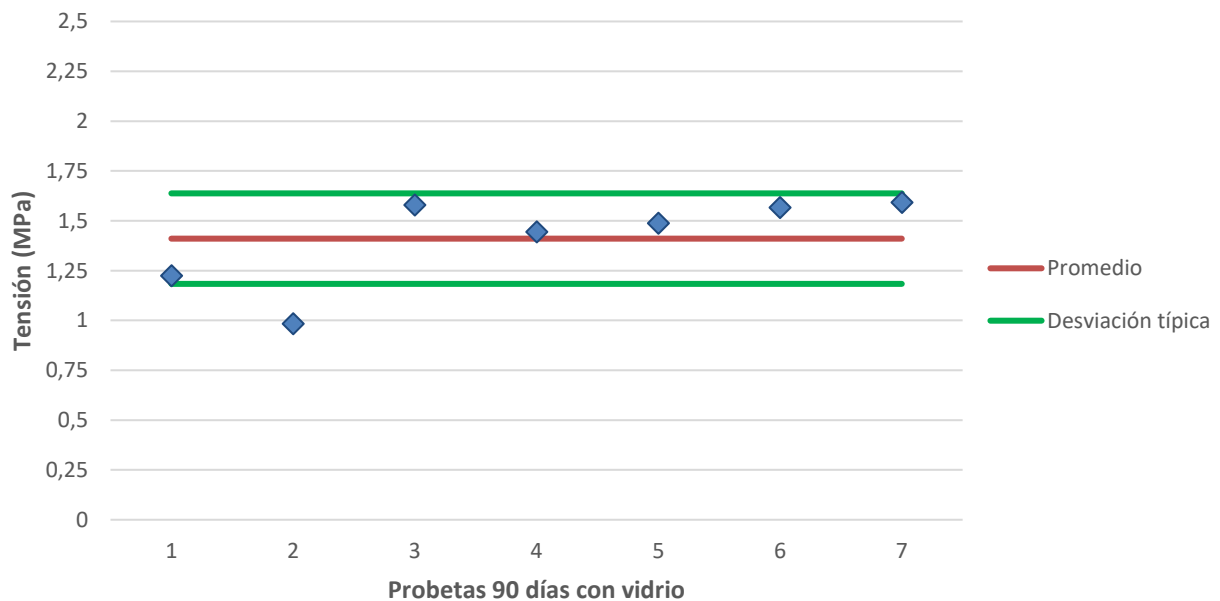


Figura 5.7. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 90 días con vidrio

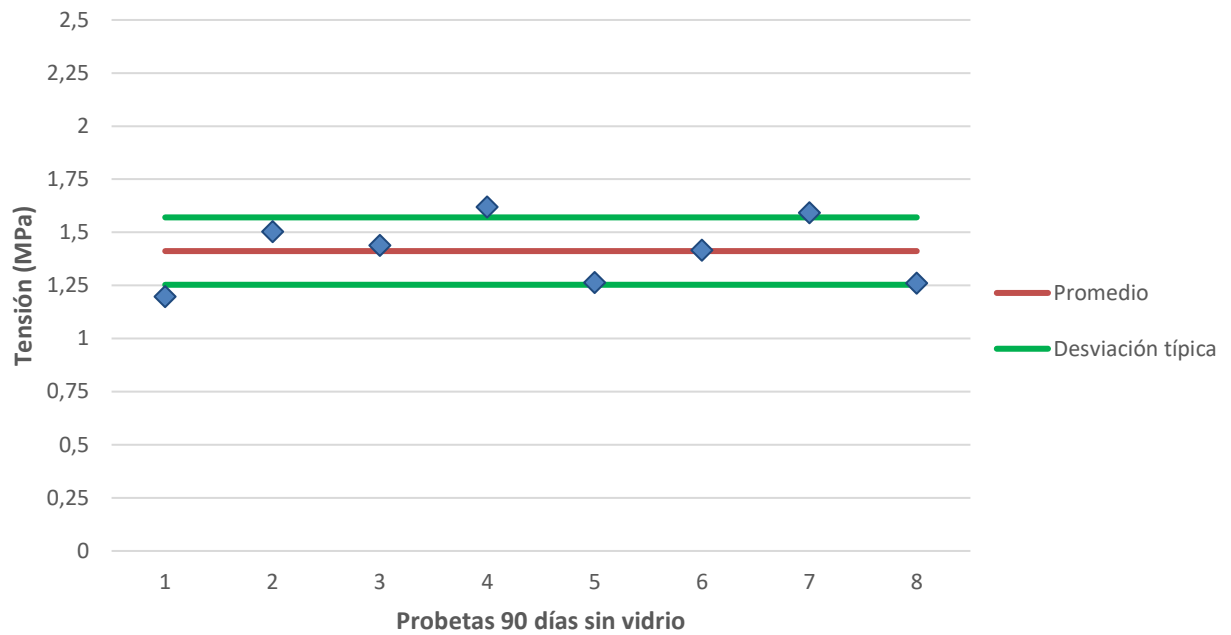


Figura 5.8. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 90 días sin vidrio

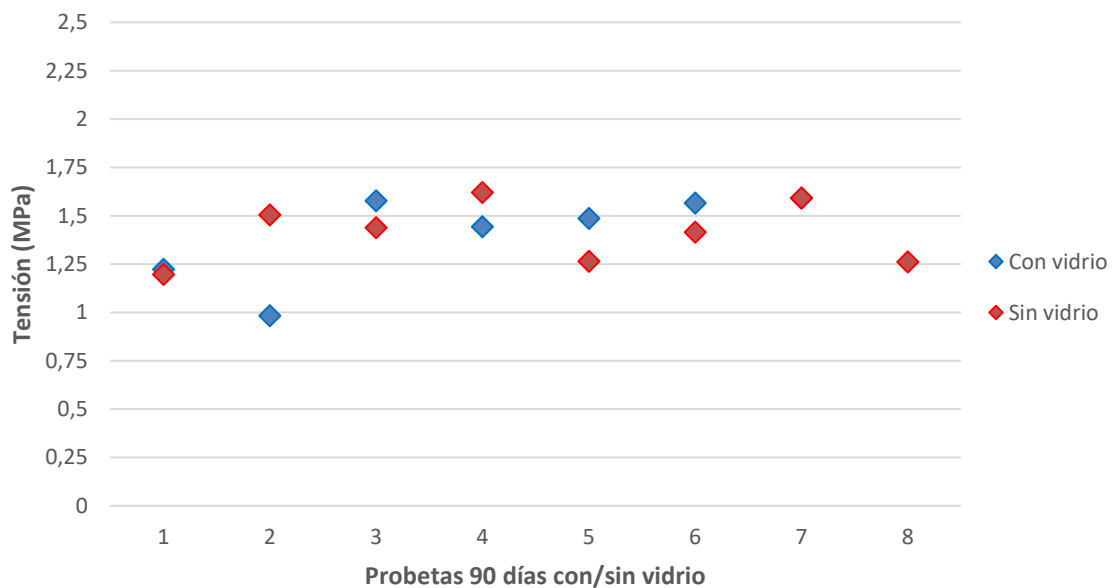


Figura 5.9. Gráfica resistencia a compresión probetas 90 días con vidrio-sin vidrio

Observando los datos de las Figuras 5.7-5.9 relativos al ensayo destructivo a los 90 días, se comprueba que la resistencia promedio para ambos tipos de probetas se mantiene semejante a los resultados obtenidos para los 60 días de secado. Teniendo en cuenta que para esta tanda de ensayos las probetas también se han refretado, se puede confirmar que la adición de 30 días más de secado no ha supuesto un aumento de la resistencia, pero sí una disminución de la dispersión. Tanto en las probetas con vidrio como en las probetas sin vidrio la desviación típica ha disminuido notablemente lo que demuestra la normalización de los resultados en resistencia con el aumento de los días de secado.

PROBETAS 90 DÍAS	Con vidrio	Sin vidrio
Resistencia característica	1,591 MPa	1,593 MPa
Desviación típica	0,227	0,159

Tabla 5.4. Resistencia característica y desviación típica, probetas 90 días

5.1.4 Probetas 120 días

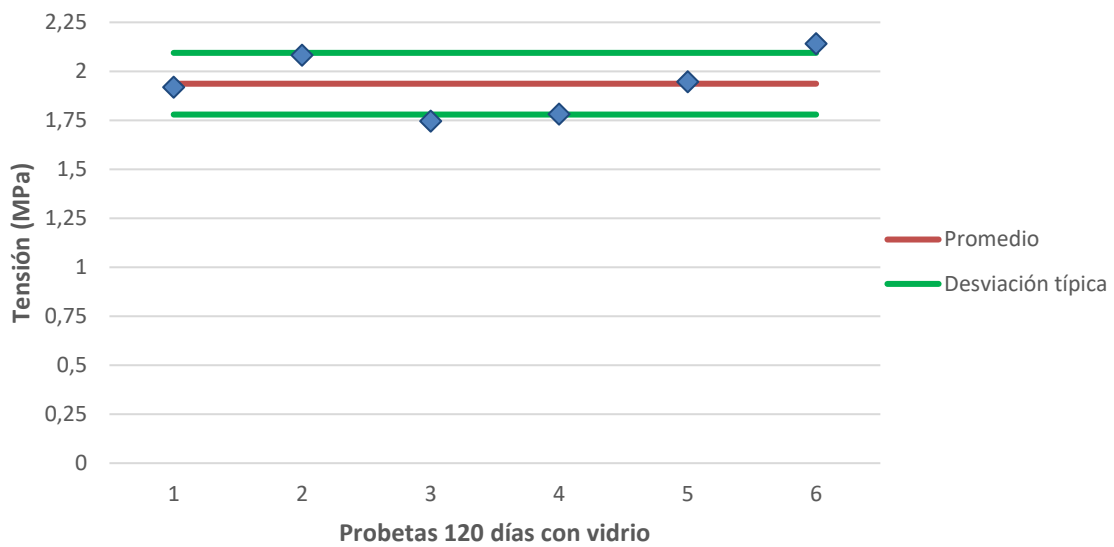


Figura 5.10. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 120 días con vidrio

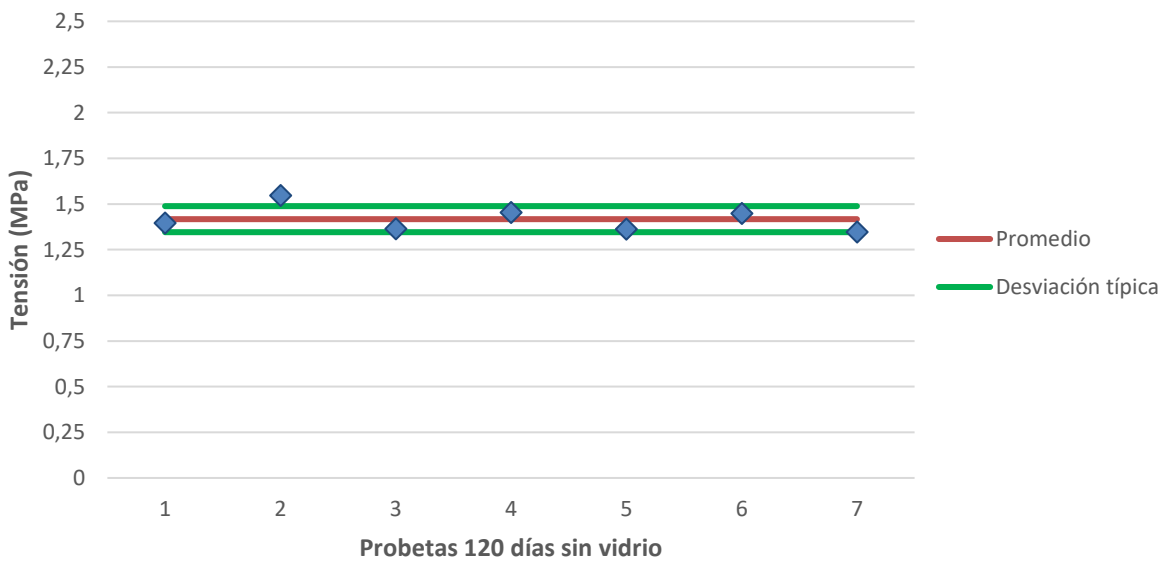


Figura 5.11. Gráfica promedio y desv. típica, resistencia a compresión probetas 120 días sin vidrio

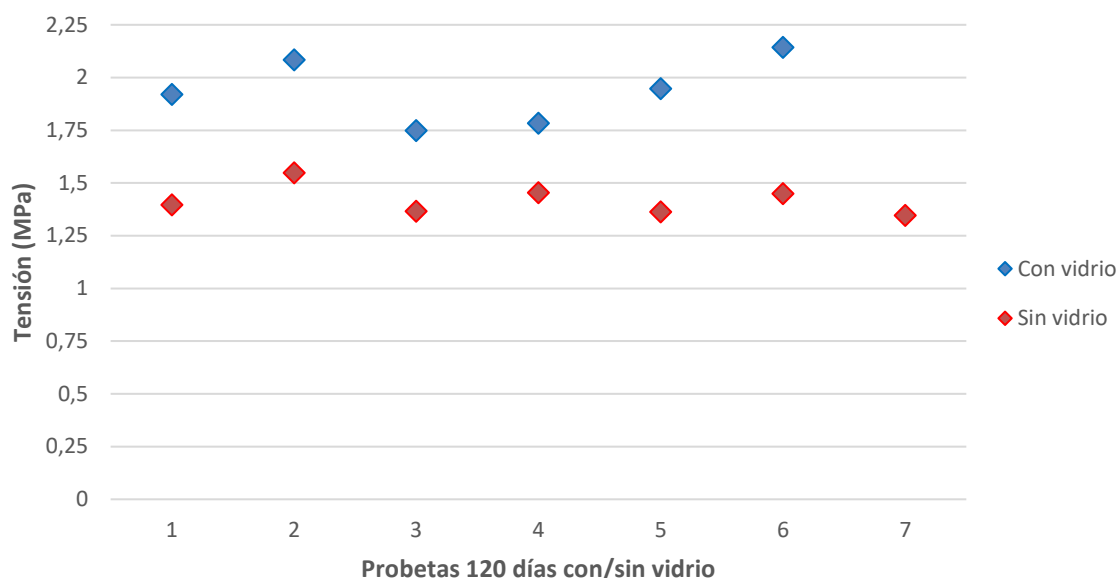


Figura 5.12. Gráfica resistencia a compresión probetas 120 días con vidrio-sin vidrio

A la vista de los resultados de las Figuras 5.10-5.12, se pueden observar algunas diferencias significativas respecto a las anteriores fechas de ensayos:

- La resistencia promedio en las probetas con vidrio ha aumentado significativamente respecto a los 90 días de secado y más aún teniendo en cuenta que no hubo cambios en la resistencia a compresión de los 60 a los 90 días. Por otro lado, la resistencia promedio de las probetas sin vidrio se ha mantenido semejante a las fechas anteriores.
- La dispersión para los 120 días ha continuado disminuyendo al mismo ritmo establecido entre los 60 y los 90 días para las probetas con vidrio y sin vidrio. De hecho, la diferencia en la desviación típica respectivamente entre las probetas con vidrio y sin vidrio a los 60, 90 y 120 días es la misma
- Aunque la resistencia característica de las probetas sin vidrio es inferior a la obtenida para las probetas con vidrio, su dispersión se reduce a casi la mitad en comparación con estas.
- Se puede observar en la Figura 5.12 como todas las probetas con vidrio tienen una mayor resistencia que las probetas sin vidrio, no quedando ninguna por debajo de estas como ha sucedido para las anteriores fechas de ensayos.

PROBETAS 120 DÍAS	Con vidrio	Sin vidrio
Resistencia característica	2,142 MPa	1,547 MPa
Desviación típica	0,157	0,071

Tabla 5.5. Resistencia característica y desviación típica, probetas 120 días

Con el objetivo de observar la variación de la resistencia a compresión de ambos tipos de probetas durante las distintas edades de ensayo se muestra la Figura 5.13, para la cual se recuerda que las probetas con vidrio se ensayaron a los 35, 73, 107 y 134 días mientras que las probetas sin vidrio se ensayaron a los 32, 73, 102 y 129 días. La Figura 5.13 se comenta como una de las conclusiones expuestas en el apartado 6.2.

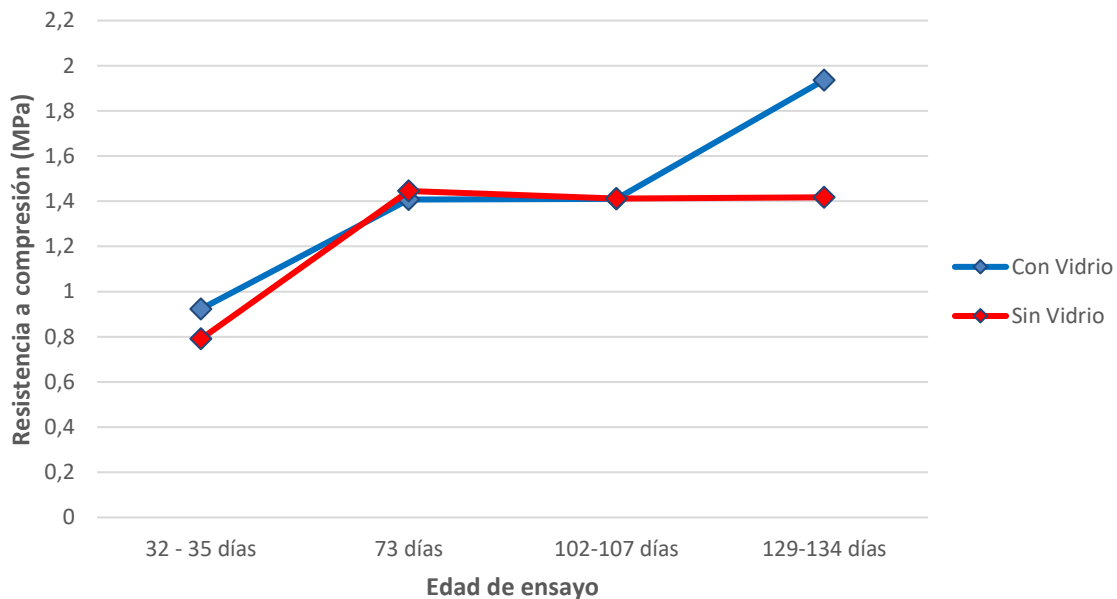


Figura 5.13. Gráfica resistencia a compresión-edad de ensayo, probetas con y sin vidrio

5.2 Curvas tensión-deformación

5.2.1 Tratamiento de datos y obtención de resultados

En los ensayos a compresión simple realizados en las distintas fechas de secado señaladas, se obtenían y guardaban tanto para las probetas con vidrio como sin vidrio, los resultados registrados por el software informático empleado para el control del ensayo. Las gráficas mostradas en el desarrollo del presente punto se han obtenido mediante el programa Matlab.

Del conjunto de datos obtenidos era especialmente relevante la deformación registrada en cada una de las dos cámaras del sistema de vídeo extensometría y las tensiones correspondientes a cada uno de esos valores en deformación. El conjunto de datos registrados en tensión-deformación estaba determinado por el paso del tiempo, de tal forma que durante la realización del ensayo, cada medio segundo se registraba un conjunto de datos. Posteriormente, estos datos fueron procesados eliminando toda aquella información no relevante. Una vez se había finalizado el tratamiento de los ficheros de datos, se procedía a la obtención de las curvas tensión-deformación mediante Matlab.

El proceso explicado a continuación se ha realizado para cada una de las fechas de ensayos donde se diferencia entre las probetas con vidrio y sin vidrio. Inicialmente, se le facilita al programa las características geométricas de las probetas tales como la sección, la altura y la distancia entre los puntos de medida de las cámaras. Se vuelcan los ficheros de datos ya tratados de los cuales se obtiene un vector de tensiones, un vector deformación del método óptico de medición. De estos datos señalados se obtiene un primer resultado no definitivo de la gráfica tensión-deformación buscada.

A continuación, se realiza una selección mediante criterio visual descartando aquellas curvas que tienen una pendiente muy acusada, un crecimiento inicial negativo o un comportamiento no válido dentro de los resultados esperados. Una vez se han descartado este tipo de curvas se procede a la obtención de dos tipos de gráficas en tensión-deformación: una de ellas donde se represente la curva promedio, el máximo y el mínimo y, por otro lado, otra curva donde se muestre la curva promedio y la desviación típica. El objetivo es comprobar que las curvas promedio y la desviación típica en las gráficas de tensión-deformación no tengan unas variaciones significativas, tengan un comportamiento creciente y una zona elástica definida, a partir de la cual se pueda calcular el valor del módulo de elasticidad para cada conjunto de probetas.

El control y modificación de cada una de las gráficas se realiza mediante una serie de parámetros definidos en Matlab: un vector con las curvas empleadas, otro vector con la última medida en tensión-deformación para cada una de las curvas empleadas y, por último, un vector deformación con particiones adaptadas a cada zona de la gráfica de tal forma que se pueda afinar o ampliar el paso empleado en el caso de que sea necesario. Los ficheros de Matlab empleados para la obtención de las gráficas se encuentran en el anexo del presente proyecto. A parte de estas gráficas, se han representado también mediante Matlab otras gráficas que no muestran el objetivo principal de los ensayos realizados, pero si muestran mediante distintas clasificaciones las curvas tensión-deformación para cada probeta. En cada fecha de ensayo se ha realizado la distinción entre probetas con y sin vidrio. Estas curvas se encuentran en el Anexo D del presente proyecto. Con todo esto, se distinguen los siguientes tipos de gráficas expuestas en la Figura 5.14.

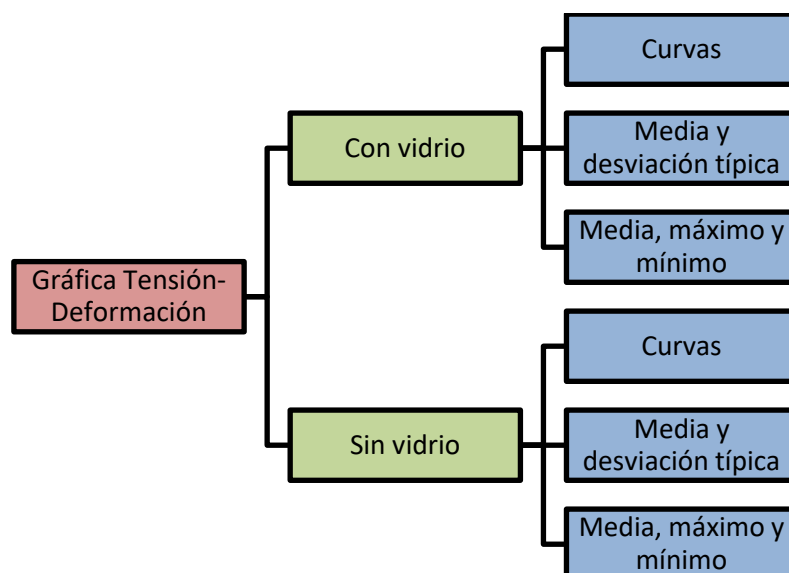


Figura 5.14. Clasificación gráficas tensión-deformación

Esto supone un total de 24 gráficas, 6 gráficas por cada fecha de ensayo de las cuales 3 son de las probetas con vidrio y 3 de las probetas sin vidrio. Con esto se pretende observar la evolución de los resultados entre distintas fechas de secado comparando las probetas con vidrio, sin vidrio y ambas a la vez.

5.2.2 Representación de gráficas

A continuación, se muestran las gráficas tensión-deformación clasificadas por fechas de ensayos. En las siguientes gráficas donde se representan las curvas, se puede comprobar en la leyenda que se han eliminado algunas de ellas debido a que estas no eran válidas para la representación de la curva promedio, la desviación típica, el máximo y el mínimo. Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal es comprobar cómo varía la desviación típica y el promedio entre las fechas de secado y entre las probetas con y sin vidrio.

5.2.2.1 Probetas 30 días

Con vidrio

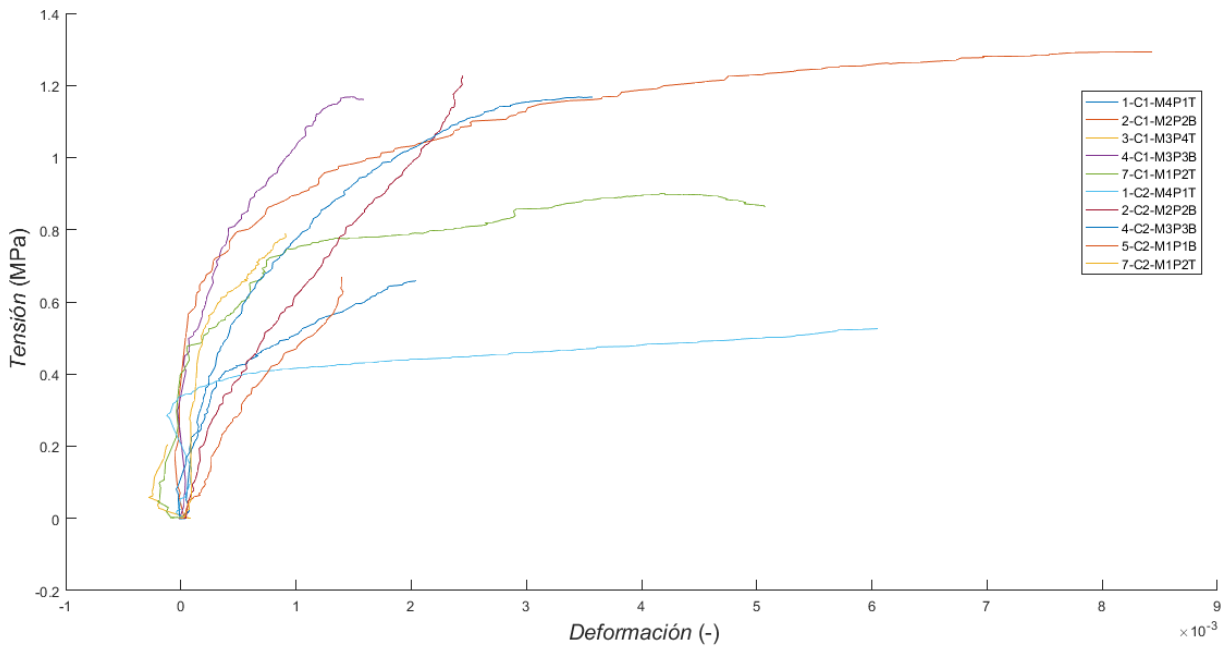


Figura 5.15. Gráfica tensión-deformación 30 días – con vidrio

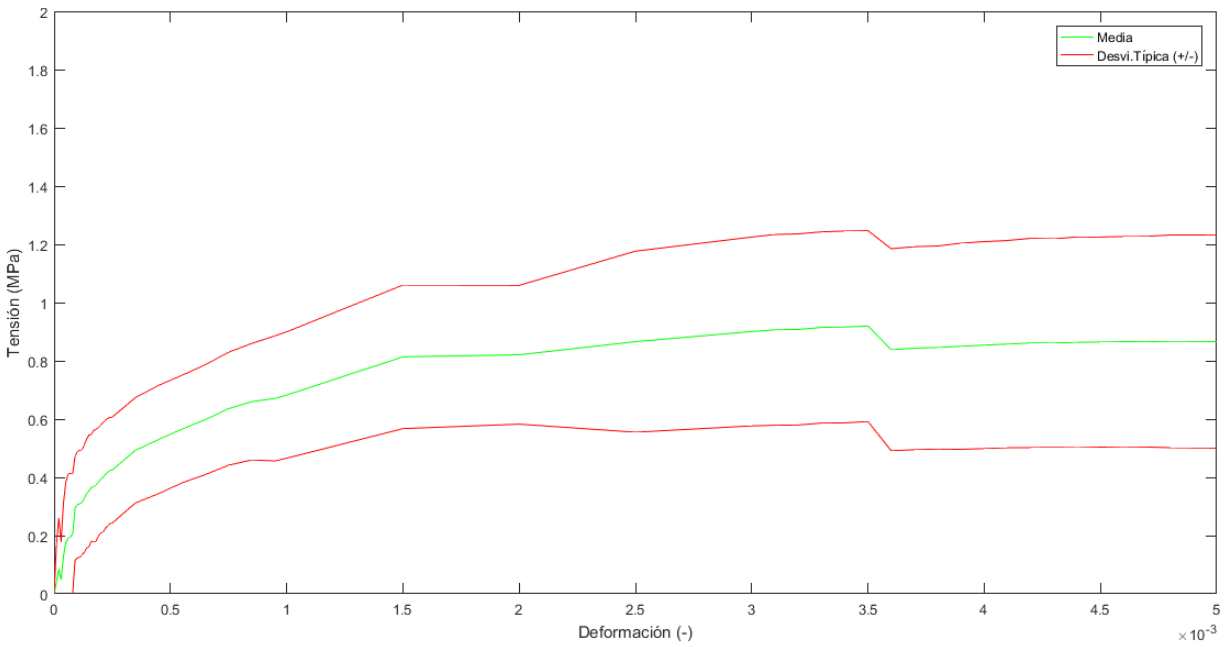


Figura 5.16. Gráfica tensión-deformación 30 días – con vidrio: media y desviación típica

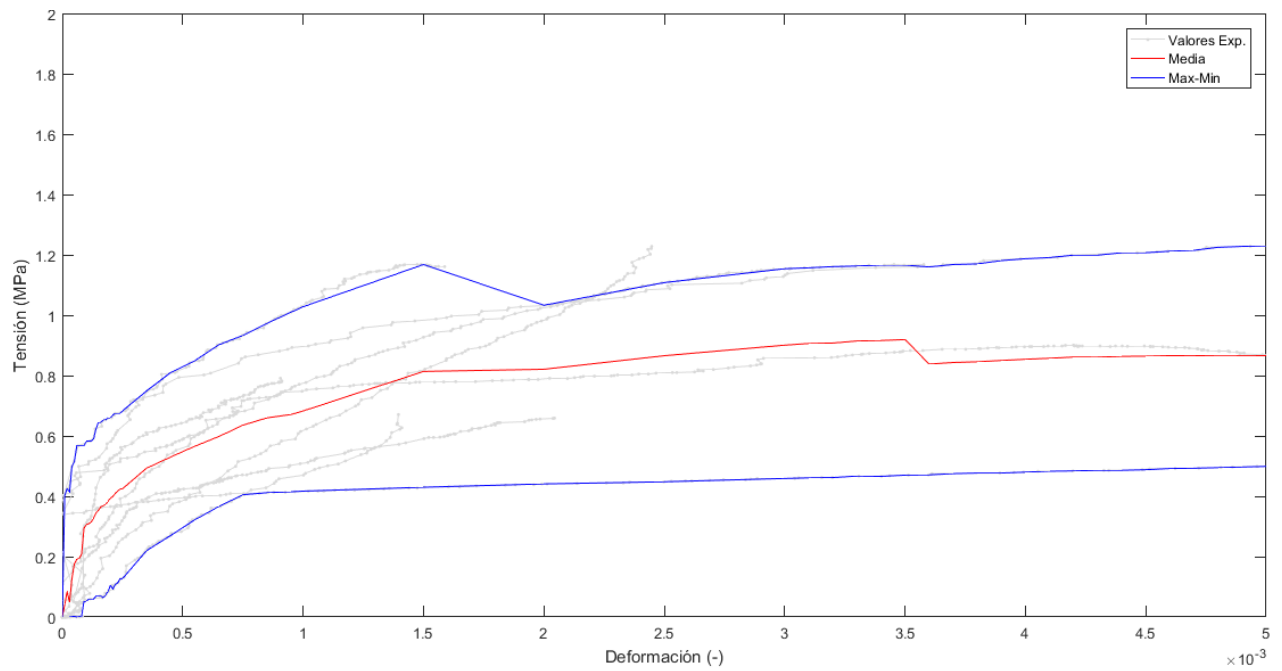


Figura 5.17. Gráfica tensión-deformación 30 días – con vidrio: media, máximo y mínimo

Sin vidrio

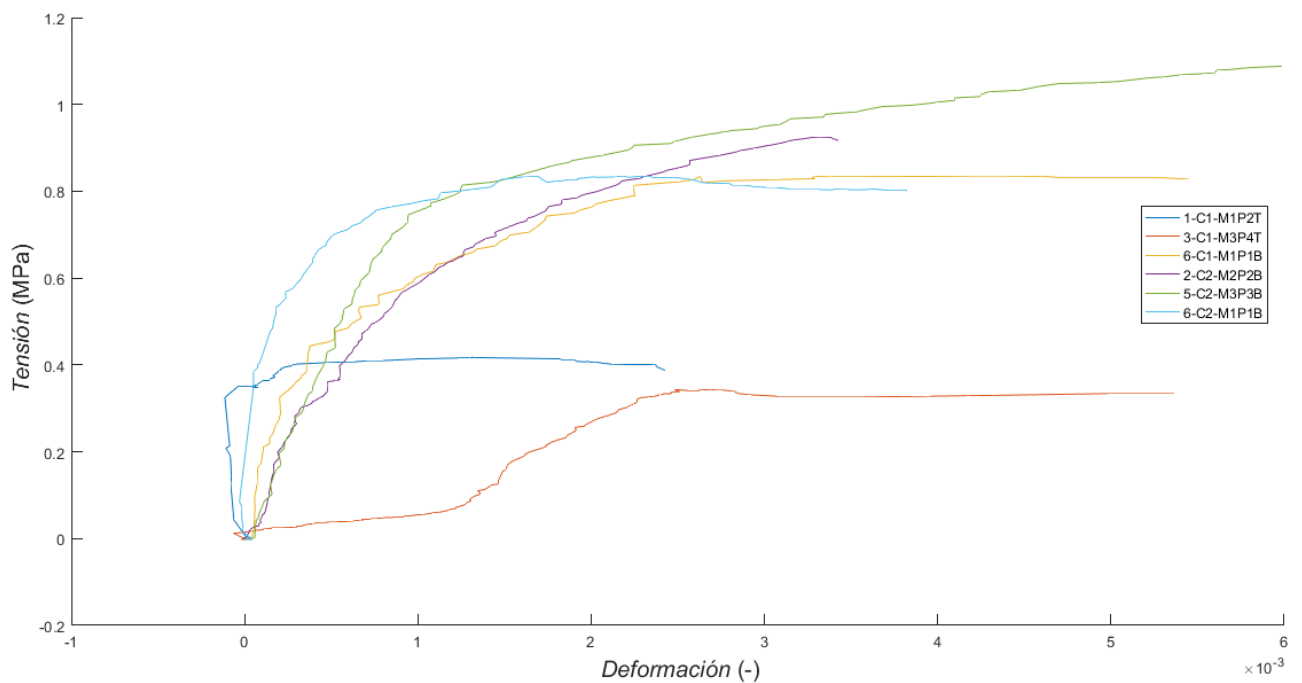


Figura 5.18. Gráfica tensión-deformación 30 días – sin vidrio

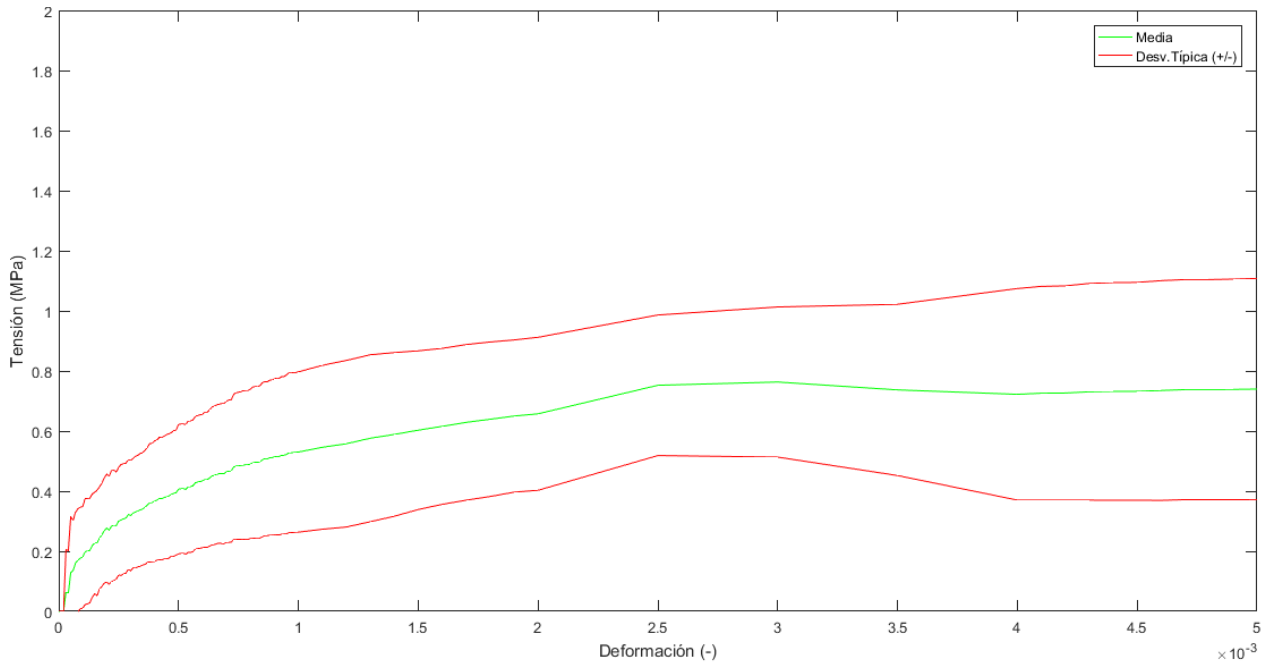


Figura 5.19. Gráfica tensión-deformación 30 días – sin vidrio: media y desviación típica

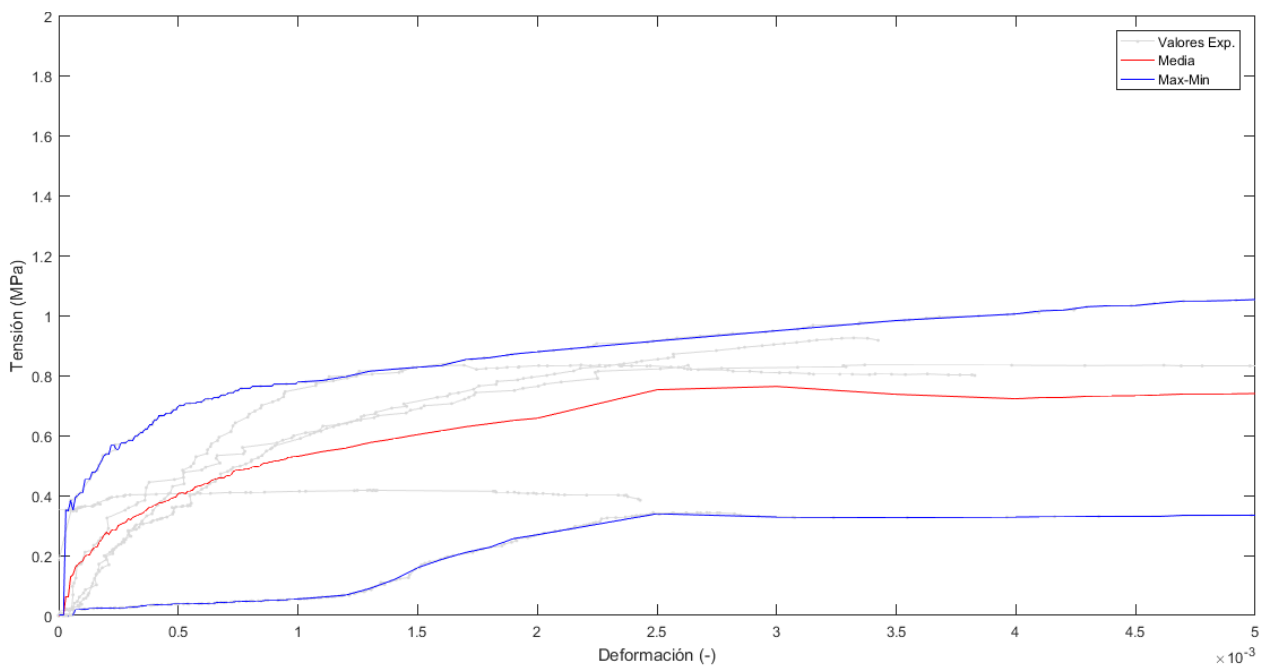


Figura 5.20. Gráfica tensión-deformación 30 días – sin vidrio: media, máximo y mínimo

En primer lugar, comparando las Figuras 5.15 y 5.18, se puede apreciar como el número de curvas sin vidrio seleccionadas es notablemente inferior al número de curvas con vidrio. Esto se debe a que en mayor número, las curvas obtenidas de las probetas sin vidrio han mostrado un comportamiento fuera de lo esperado y se han descartado para el análisis.

Otro aspecto a destacar es la acusada dispersión tanto en la Figura 5.16 como en la Figura 5.19. A su vez, en ambas figuras se observa a partir de una deformación relativa de 3.5×10^{-3} una cierta zona de fluencia precedida de un tramo pequeño donde la tensión disminuye levemente mientras la deformación aumenta. Este comportamiento promedio de las probetas con y sin vidrio a 30 días de secado, puede deberse a que durante el ensayo a compresión se ha producido una cierta redistribución de esfuerzos lo que ha llevado a una leve disminución de la tensión, a partir de la cual esta se ha mantenido constante mientras seguía aumentando la deformación.

5.2.2.2 Probetas 60 días

Con vidrio

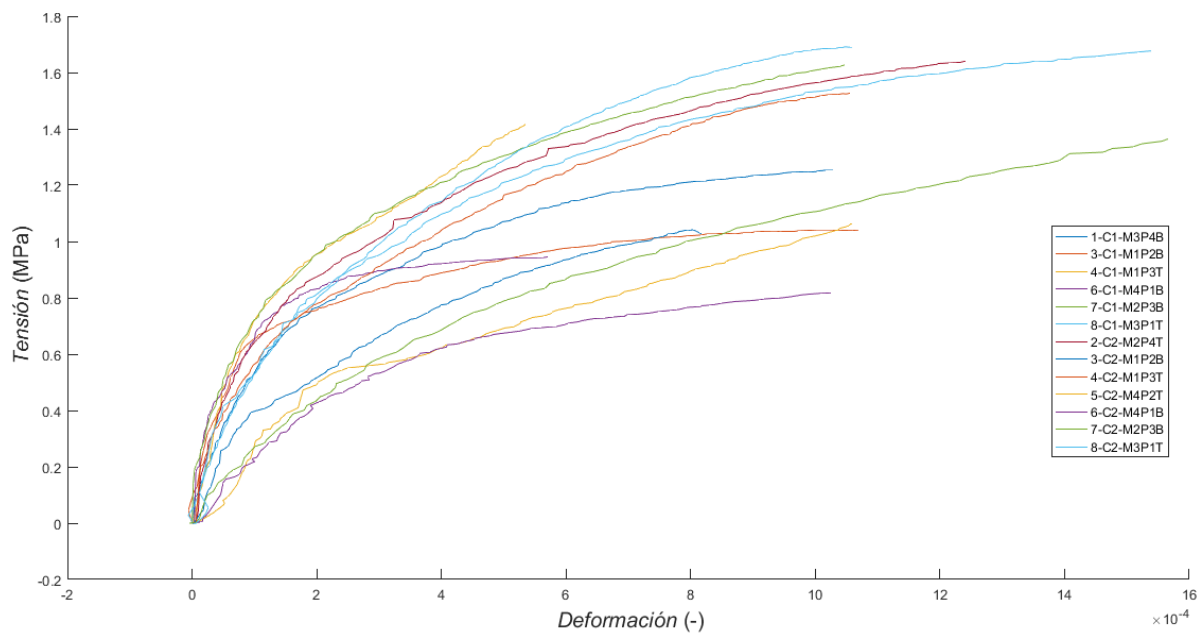


Figura 5.21. Gráfica tensión-deformación 60 días – con vidrio

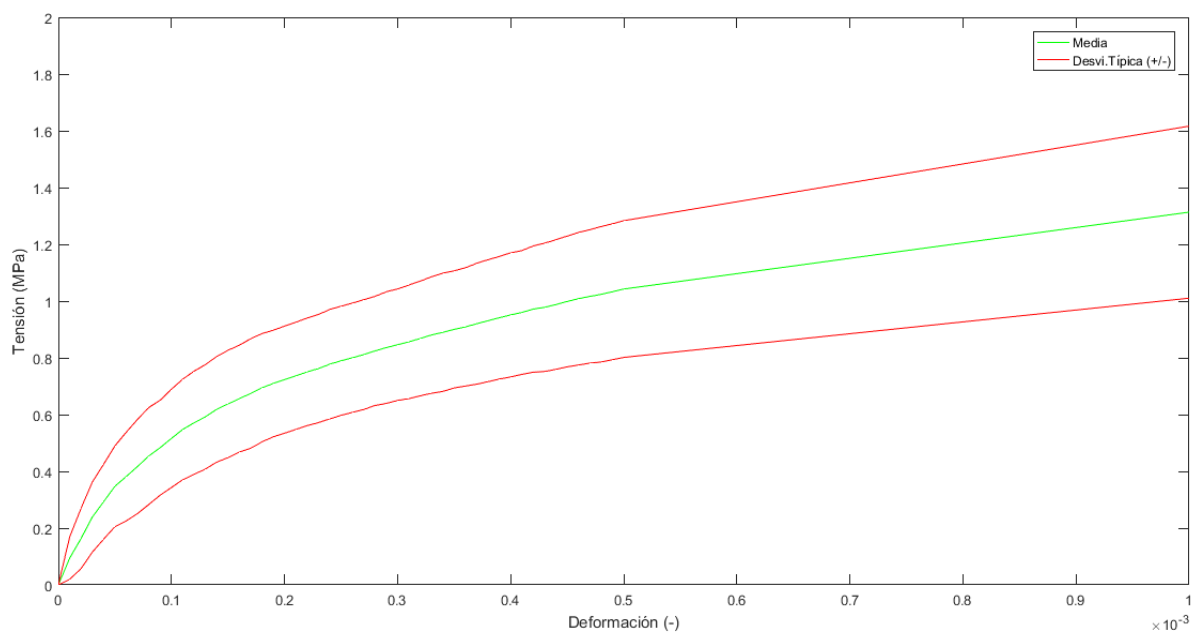


Figura 5.22. Gráfica tensión-deformación 60 días – con vidrio: media y desviación típica

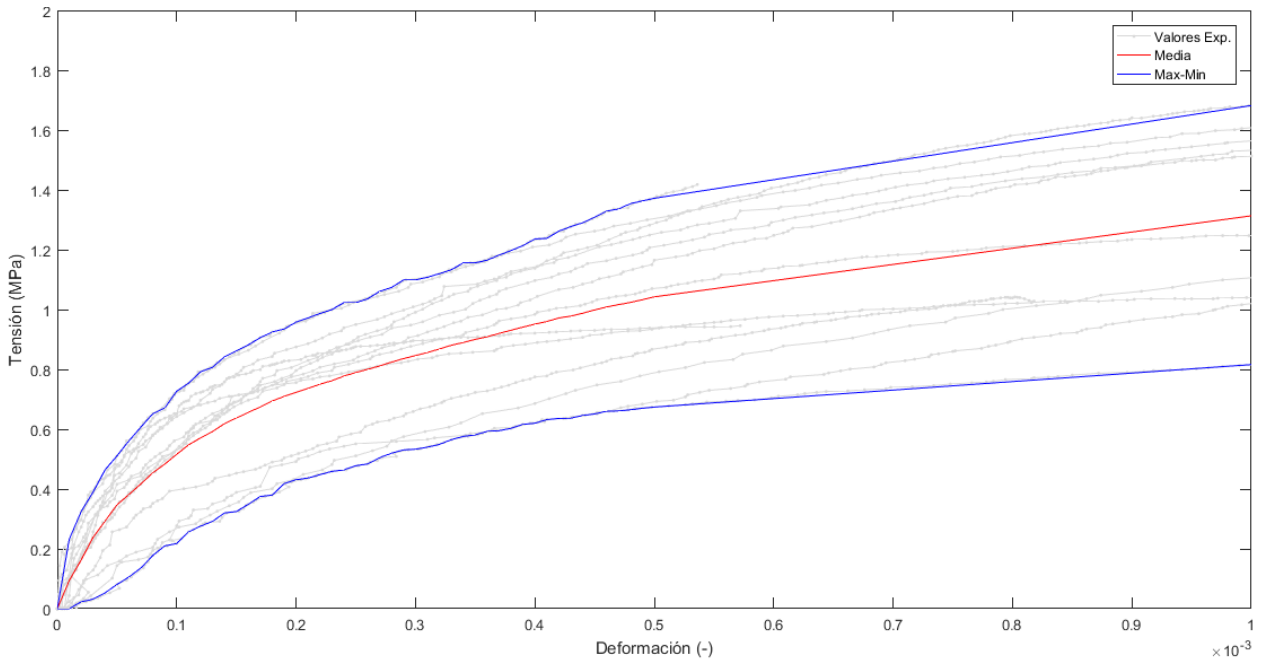


Figura 5.23. Gráfica tensión-deformación 60 días – con vidrio: media, máximo y mínimo

Sin vidrio

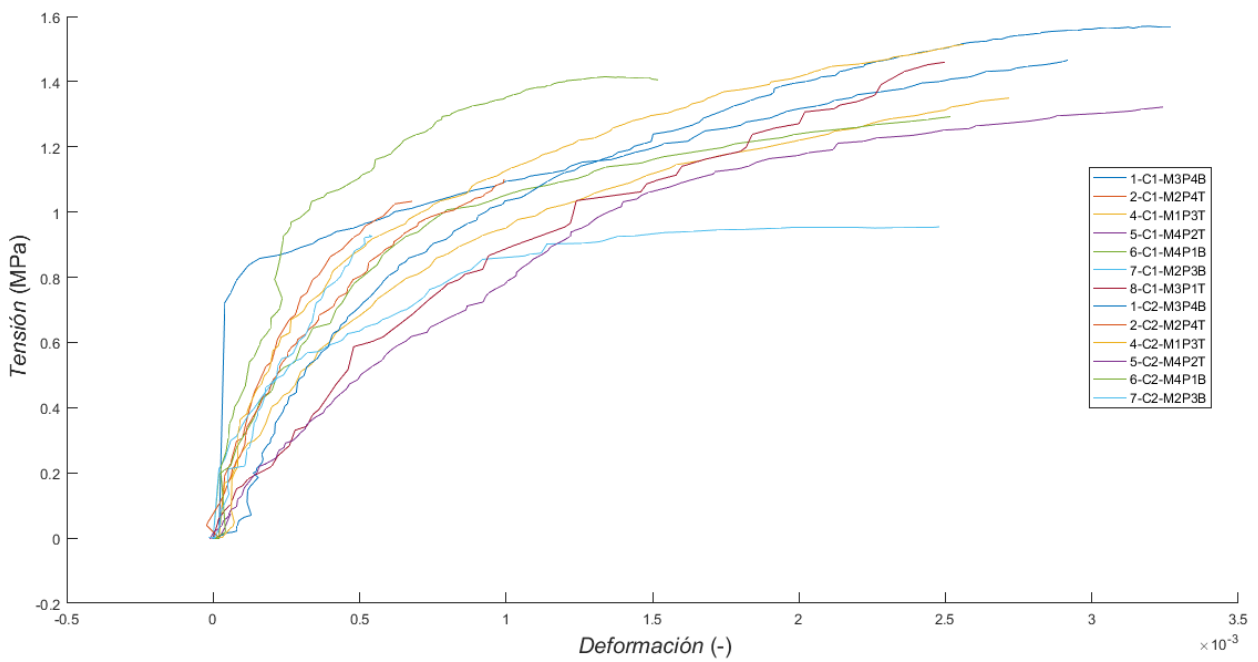


Figura 5.24. Gráfica tensión-deformación 60 días – sin vidrio

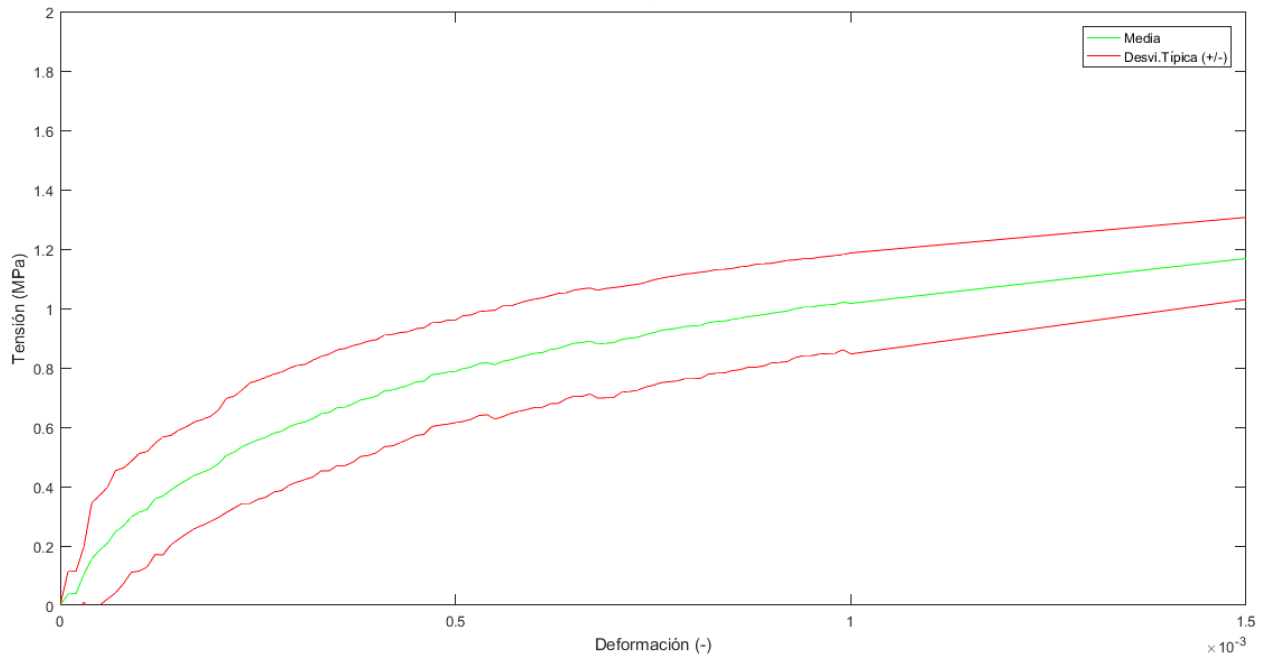


Figura 5.25. Gráfica tensión-deformación 60 días – sin vidrio: media y desviación típica

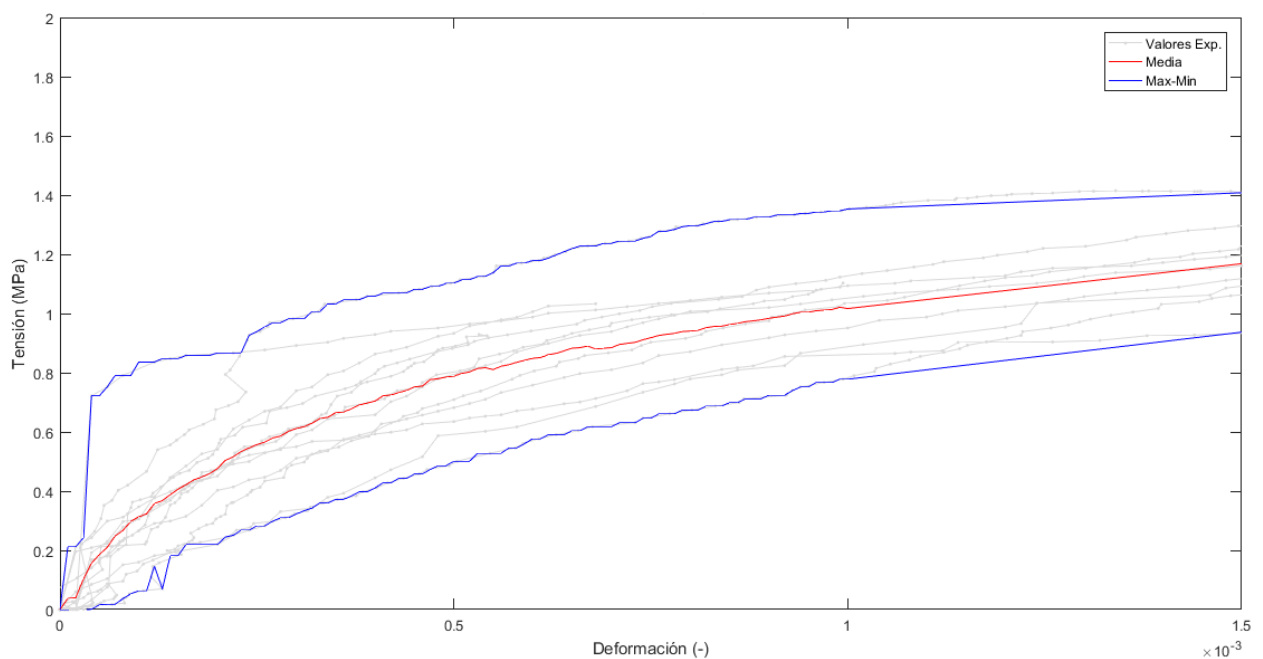


Figura 5.26. Gráfica tensión-deformación 60 días – sin vidrio: media, máximo y mínimo

La Figura 5.24 en comparación con la Figura 5.18 a los 30 días de secado, presenta un mayor número de curvas válidas para la obtención de la curva tensión-deformación promedio. Esto puede ser una consecuencia del mayor tiempo de secado, lo que haya llevado a una mayor consistencia en las probetas y como consecuencia a que estas tengan un comportamiento más normalizado en el ensayo a compresión. Por otro lado, puede ser consecuencia también del refrentado de las probetas lo que ha llevado a que la carga se aplique uniformemente sobre la superficie de contacto de la probeta y con ello a una mejor distribución de esfuerzos sobre la misma.

En cuanto a la Figura 5.21 se puede observar como las curvas representadas consideradas válidas muestran un comportamiento prácticamente ideal con un tramo elástico claramente diferenciado, en comparación con la Figura 5.15 a los 30 días de secado donde no ocurre de una forma tan evidente. Esto puede ser efecto también del refrentado y de un mayor tiempo de secado para las probetas.

5.2.2.3 Probetas 90 días

Con vidrio

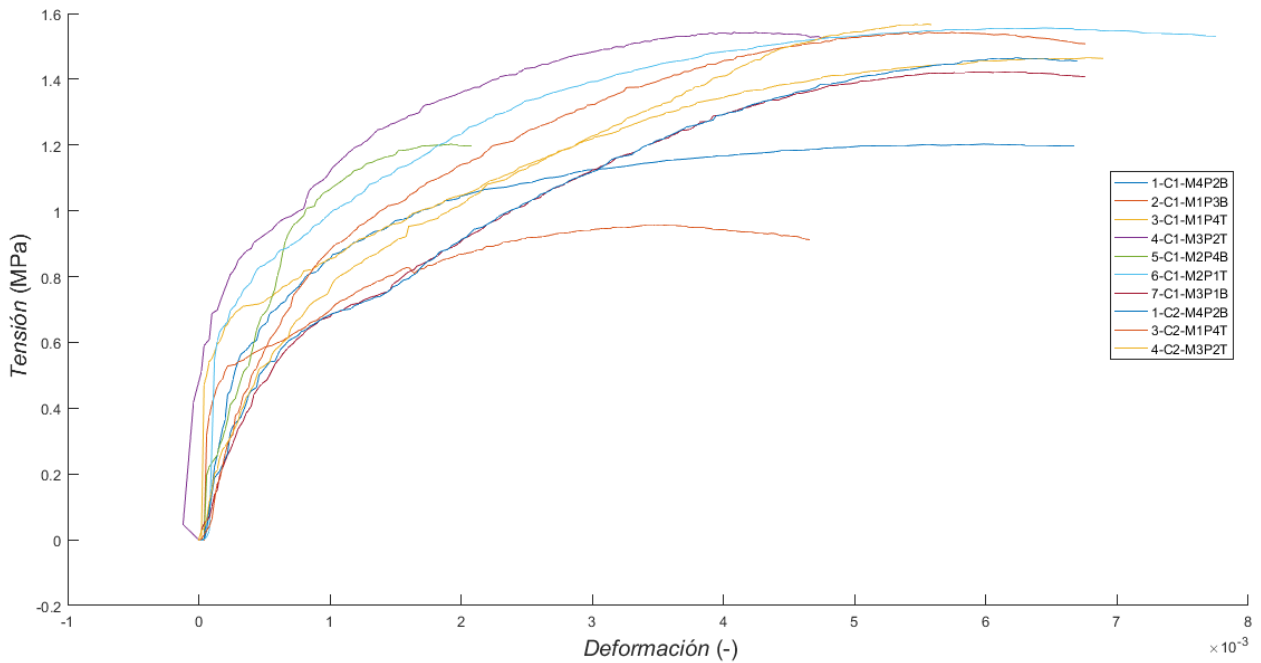


Figura 5.27. Gráfica tensión-deformación 90 días – con vidrio

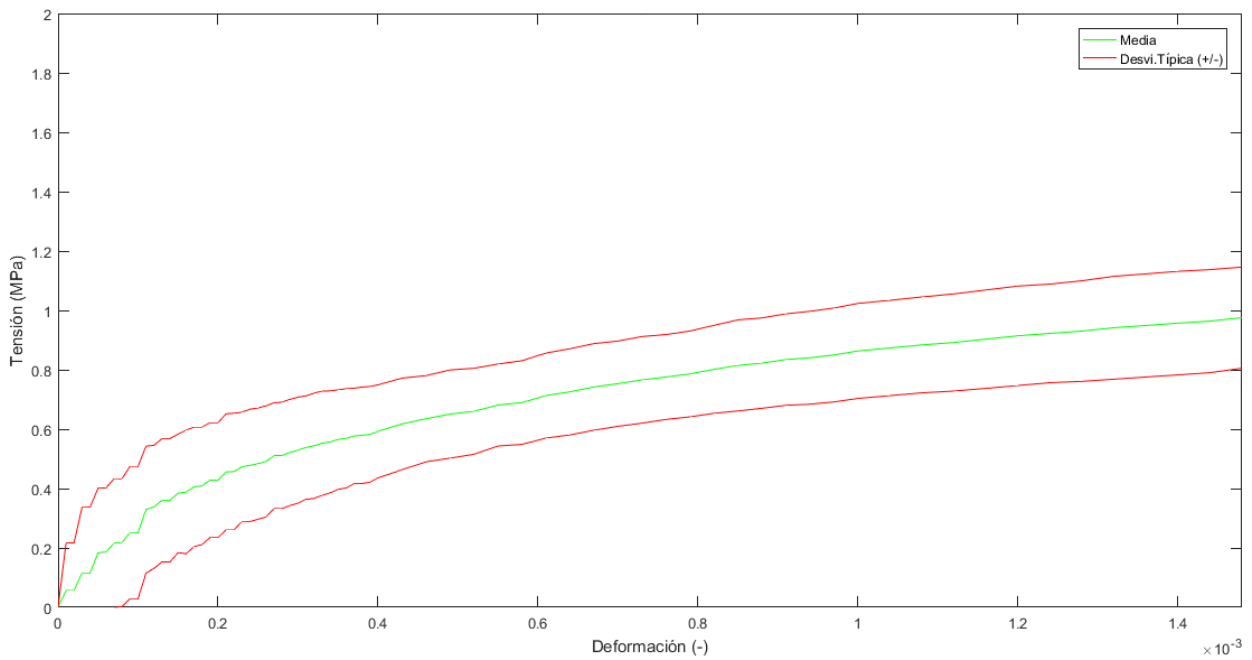


Figura 5.28. Gráfica tensión-deformación 90 días – con vidrio: media y desviación típica

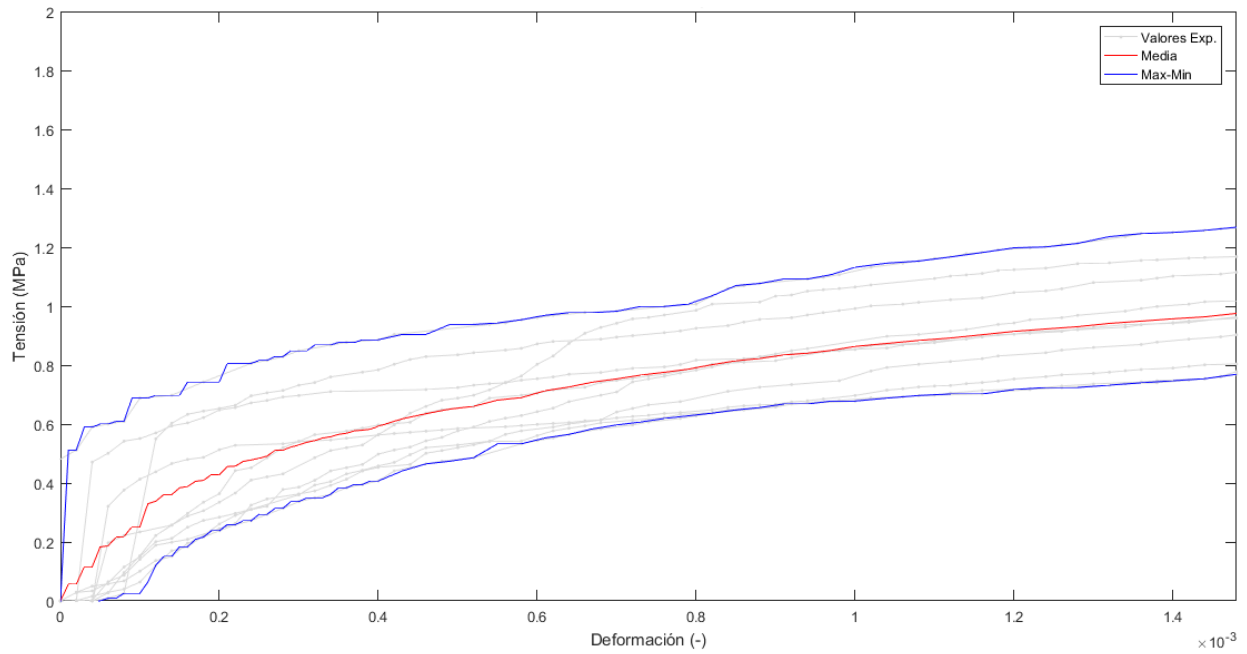


Figura 5.29. Gráfica tensión-deformación 90 días – con vidrio: media, máximo y mínimo

Sin vidrio

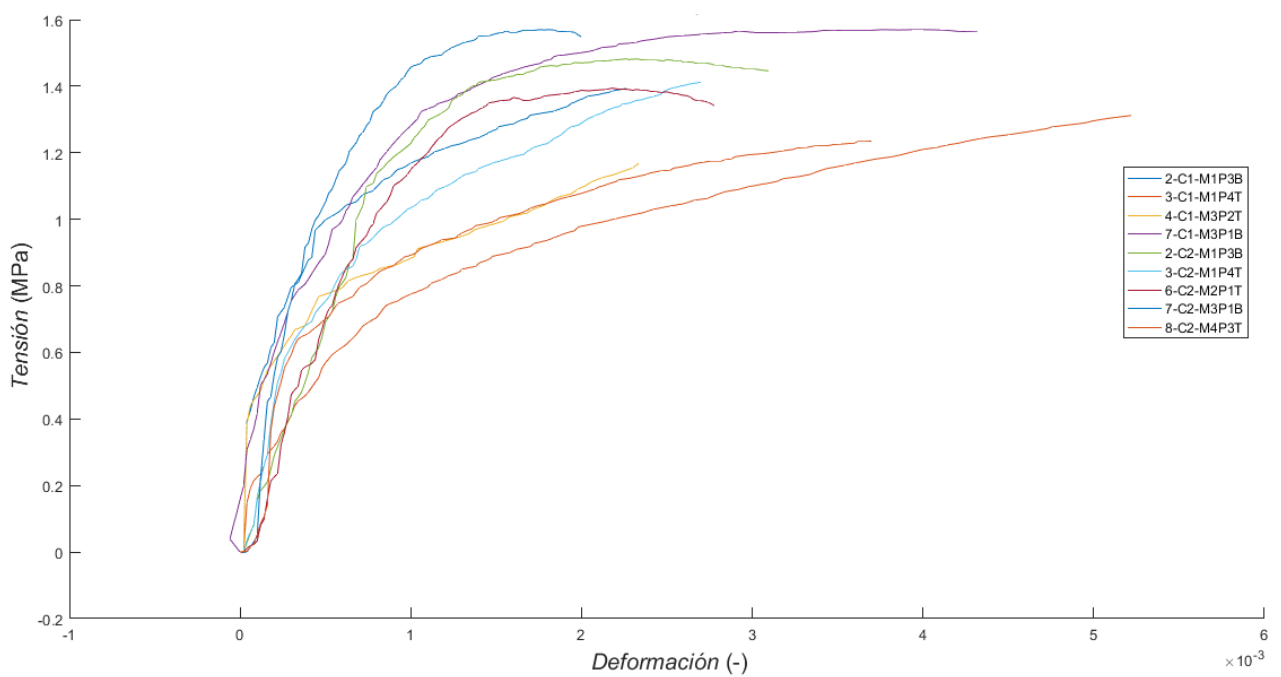


Figura 5.30. Gráfica tensión-deformación 90 días – sin vidrio

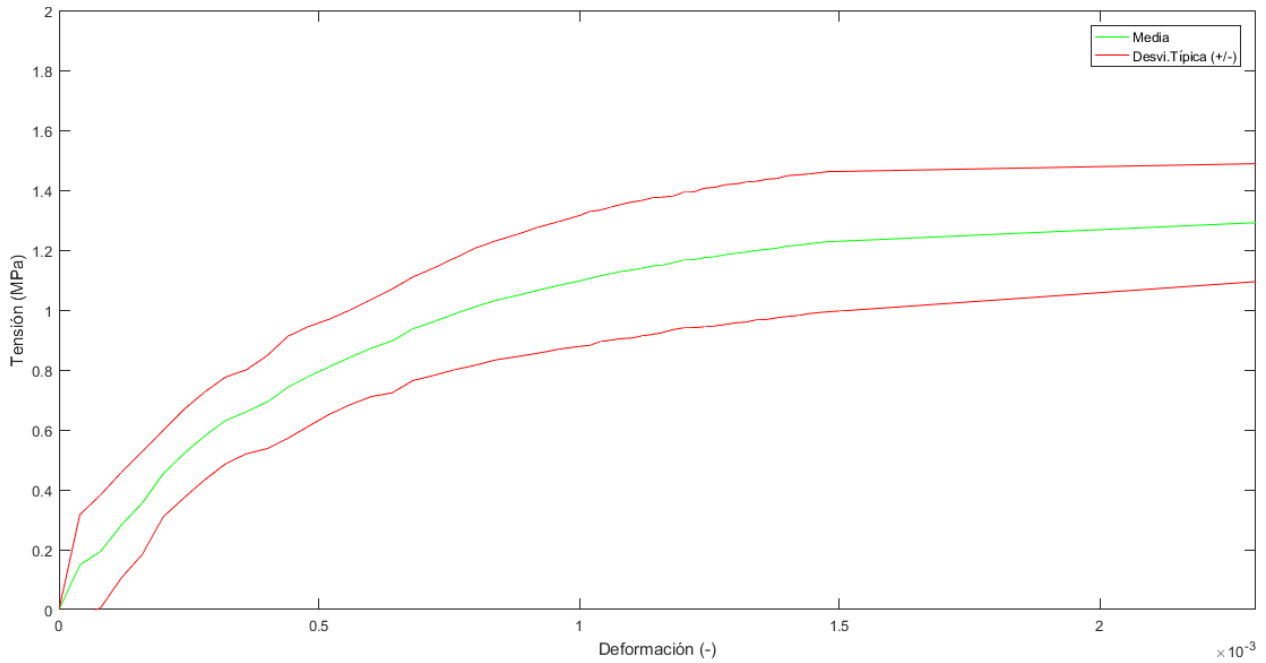


Figura 5.31. Gráfica tensión-deformación 90 días – sin vidrio: media y desviación típica

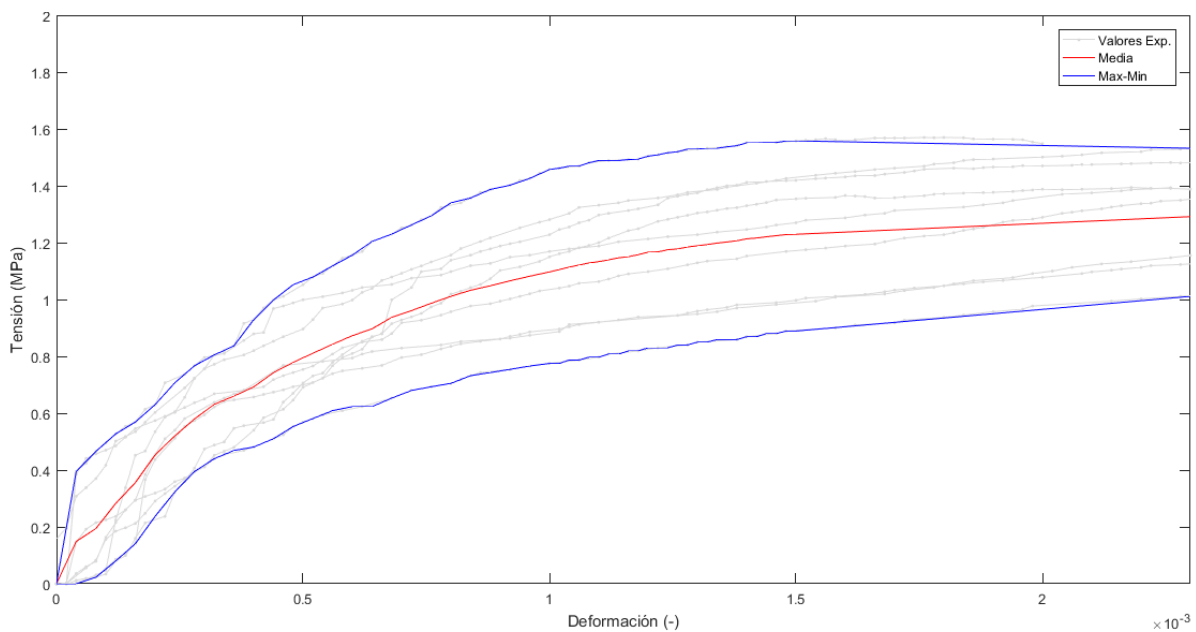


Figura 5.32. Gráfica tensión-deformación 90 días – sin vidrio: media, máximo y mínimo

En las gráficas tensión-deformación obtenidas para los 90 días de secado no existe una gran diferencia respecto a las obtenidas para los 60 días de secado. A su vez, a los 90 días de secado, se puede observar una zona lineal tanto en la Figura 5.28 como en la Figura 5.31, aunque es apreciable que la dispersión es ligeramente menor en la primera figura lo que indica un comportamiento más favorable para las probetas con vidrio.

5.2.2.4 Probetas 120 días

Con vidrio

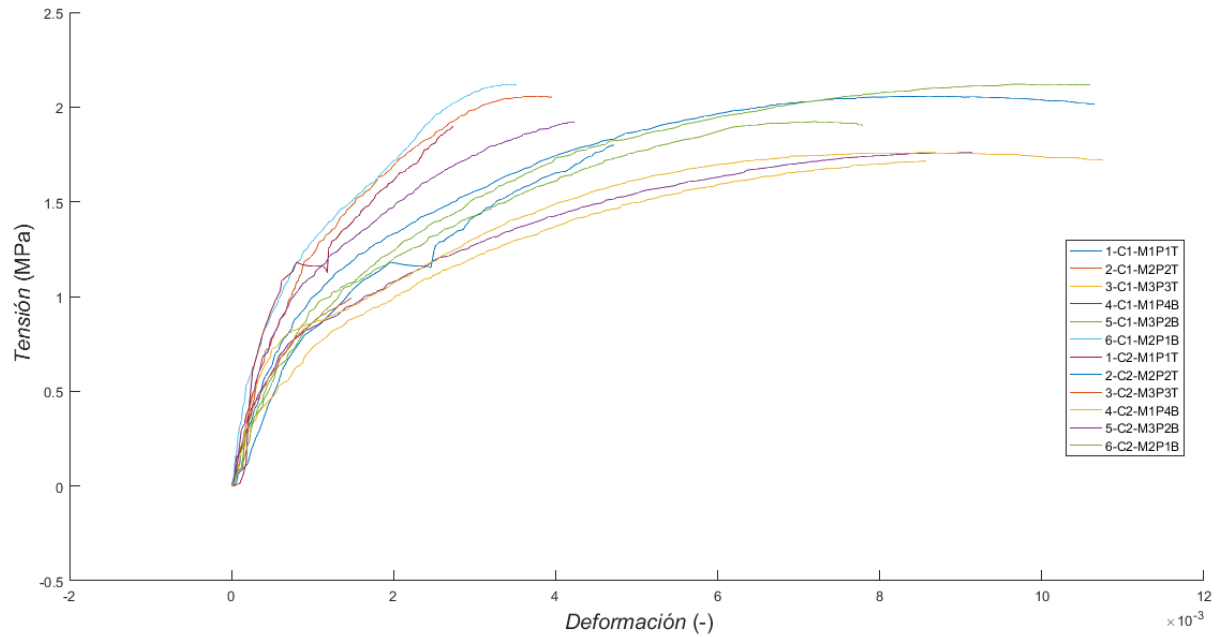


Figura 5.33. Gráfica tensión-deformación 120 días – con vidrio

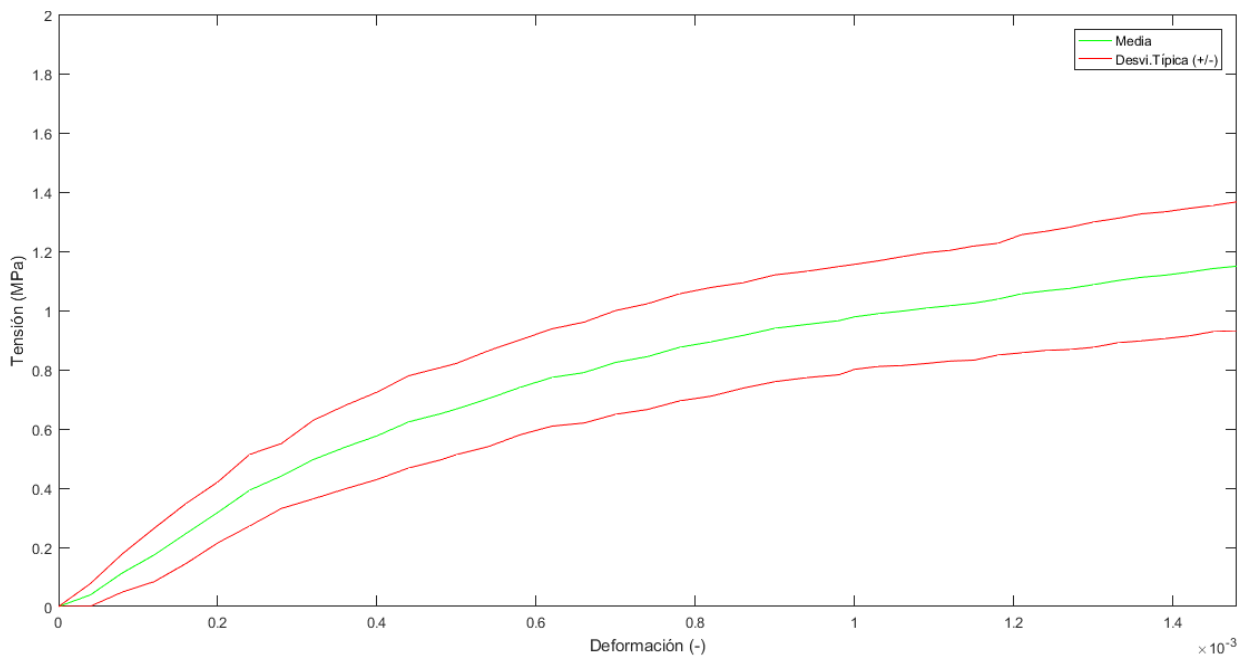


Figura 5.34. Gráfica tensión-deformación 120 días – con vidrio: media y desviación típica

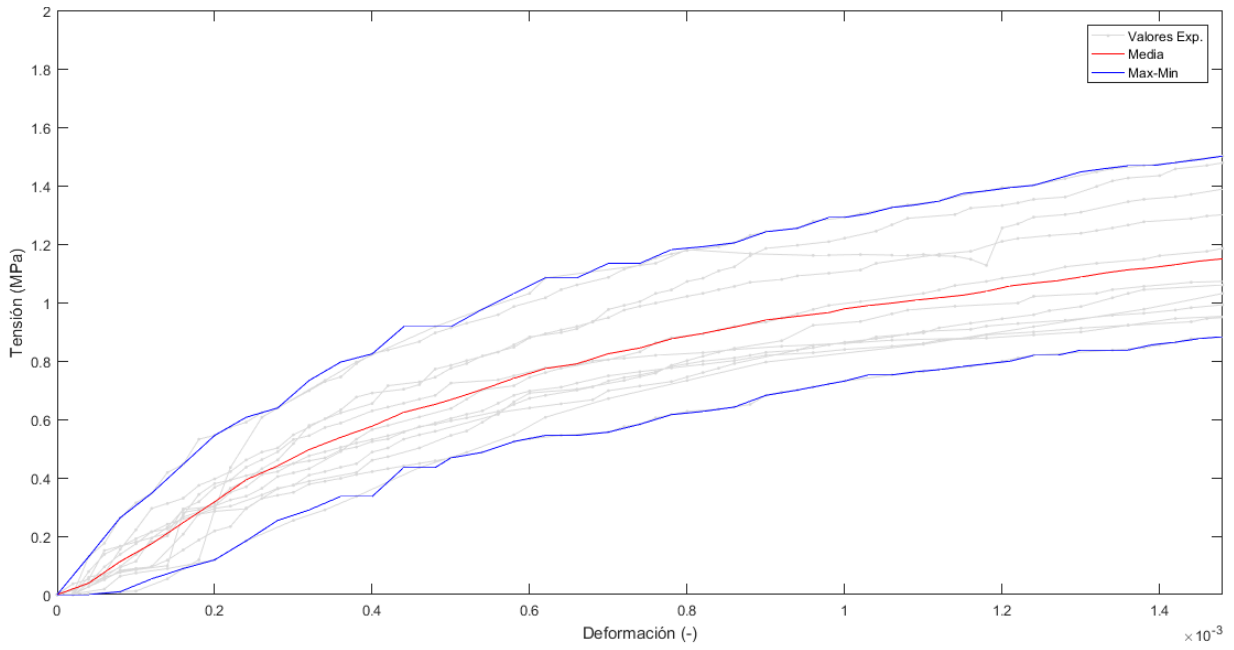


Figura 5.35. Gráfica tensión-deformación 120 días – con vidrio: media, máximo y mínimo

Sin vidrio

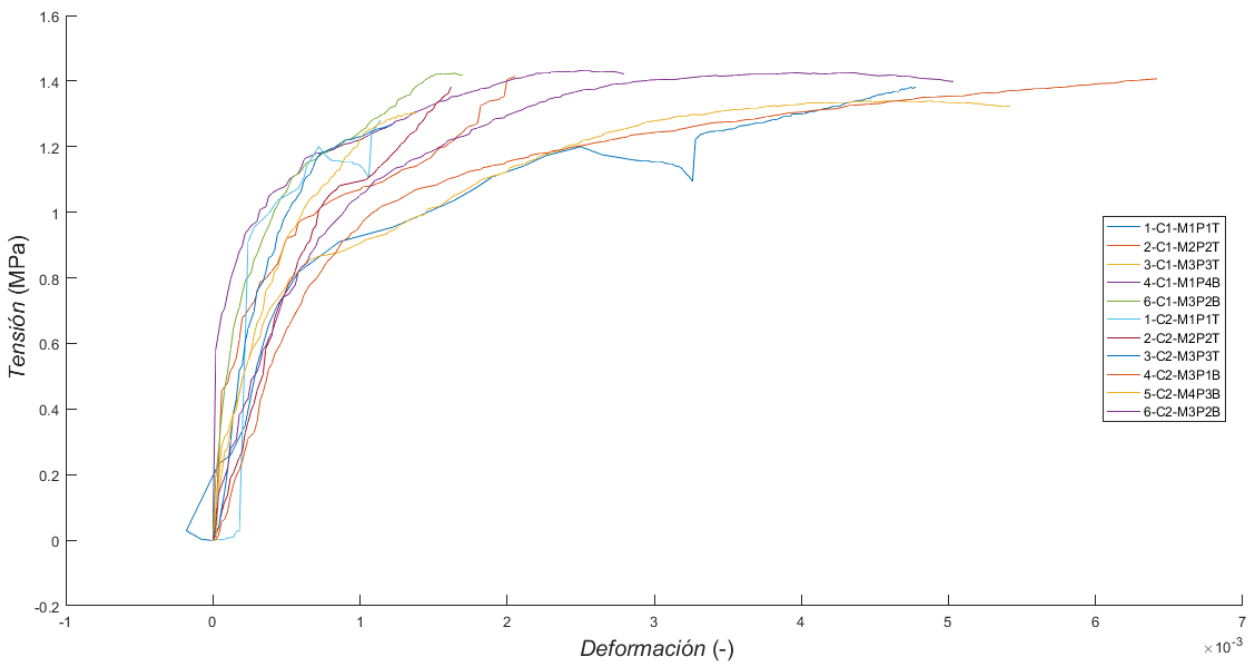


Figura 5.36. Gráfica tensión-deformación 120 días – sin vidrio

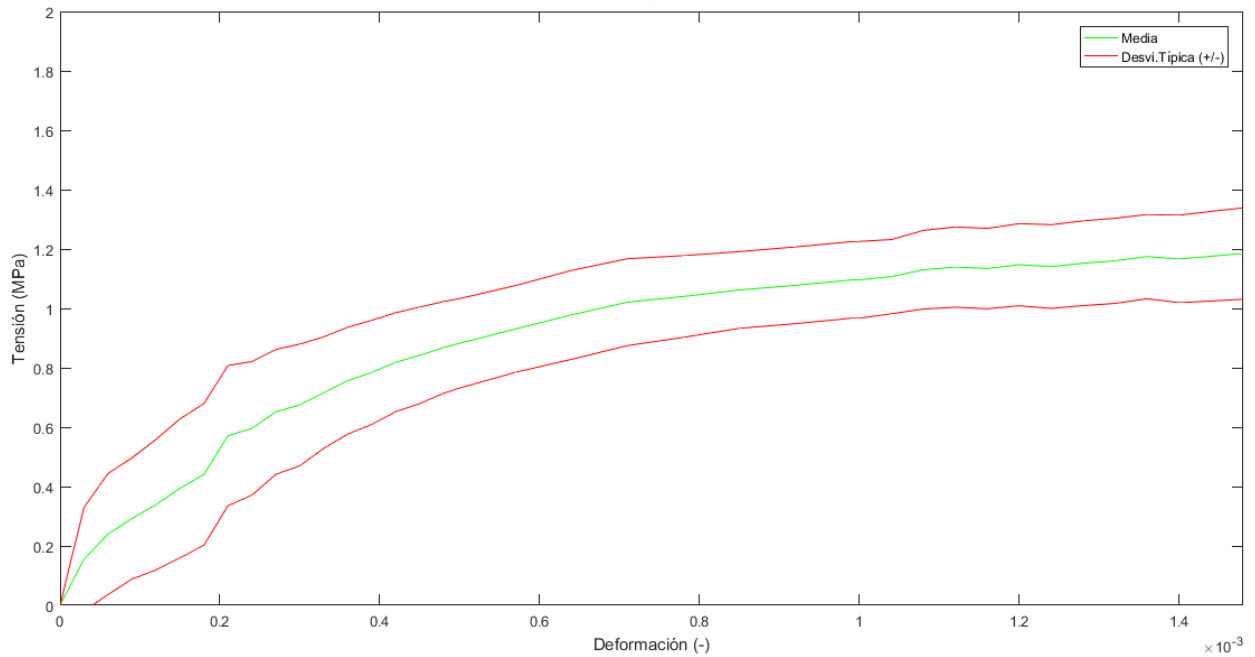


Figura 5.37. Gráfica tensión-deformación 120 días – sin vidrio: media y desviación típica

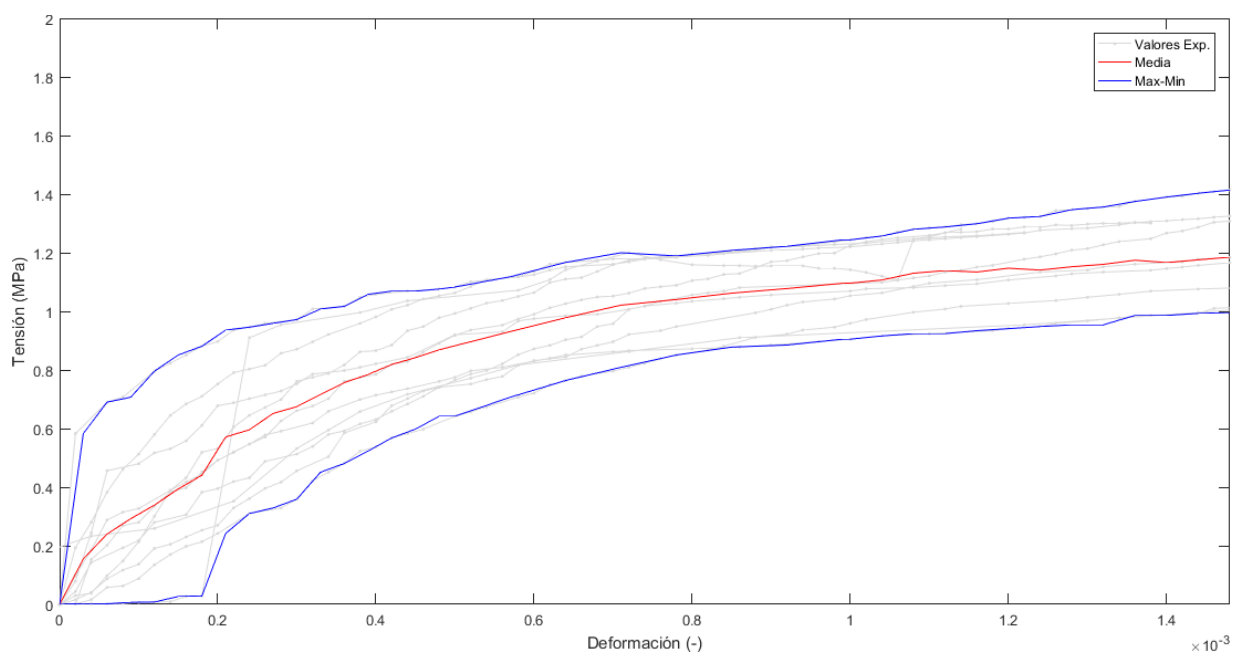


Figura 5.38. Gráfica tensión-deformación 120 días – sin vidrio: media, máximo y mínimo

Entre la Figura 5.34 y la Figura 5.37 únicamente se ha descartado una curva tensión-deformación lo que en comparación con las anteriores fechas de secado muestra de media un mejor comportamiento para las probetas a 120 días de secado. Para esta fecha de secado, tanto ambos tipos de curvas muestran una zona elástica lineal así como una dispersión reducida al igual que ocurre con las curvas a los 60 y 90 días de secado. Para comparar los resultados obtenidos en tensión-deformación de forma más directa entre las distintas edades a las que se han realizado los ensayos a compresión, se muestran las Figuras 5.39-5.43.

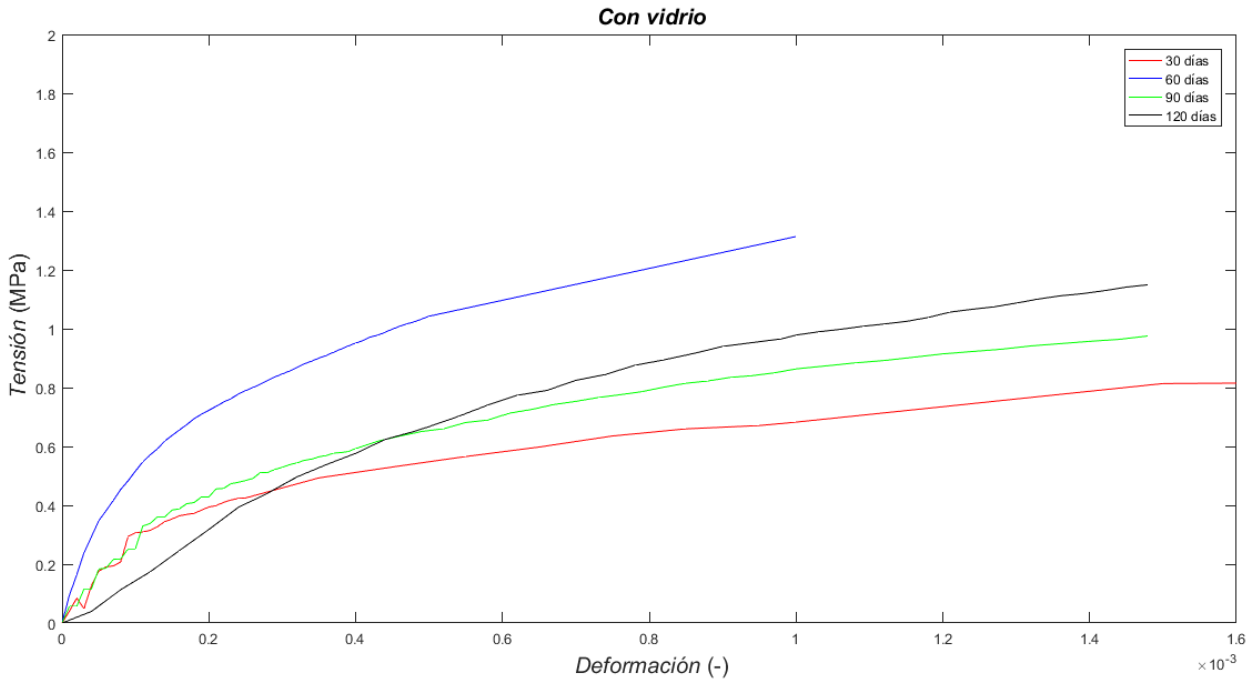


Figura 5.39. Gráfica tensión-deformación con vidrio a todas las edades de secado

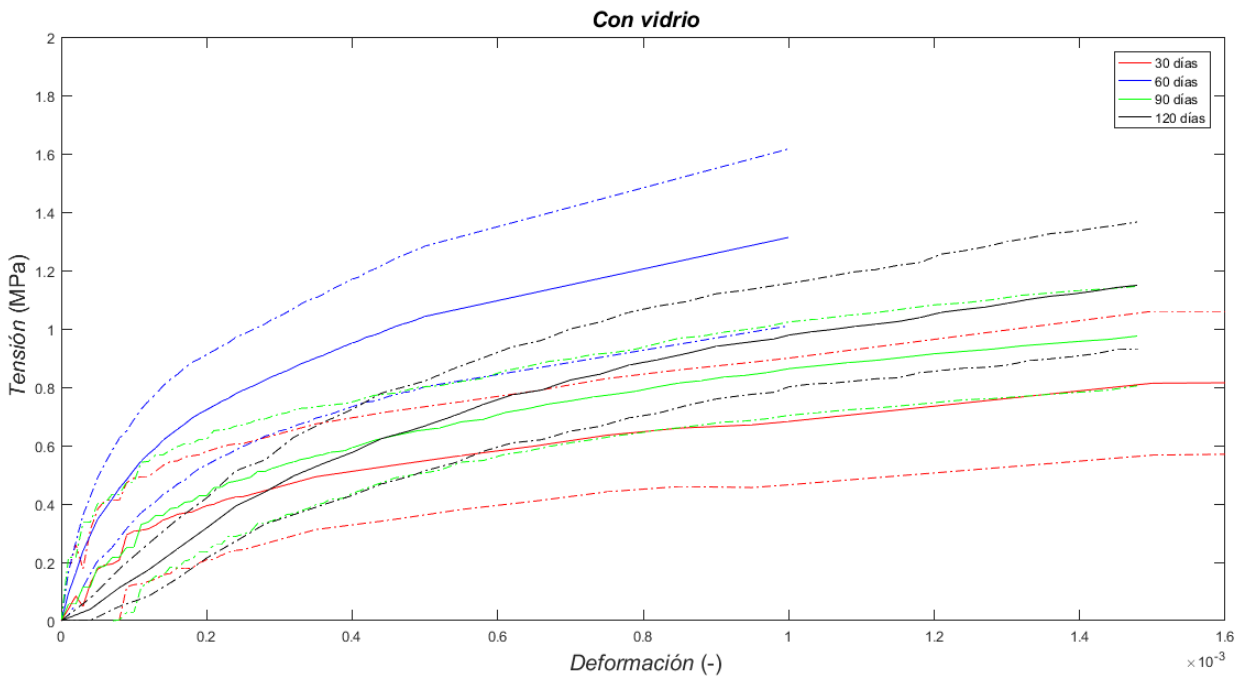


Figura 5.40. Gráfica tensión-deformación y desv. típica con vidrio a todas las edades de secado

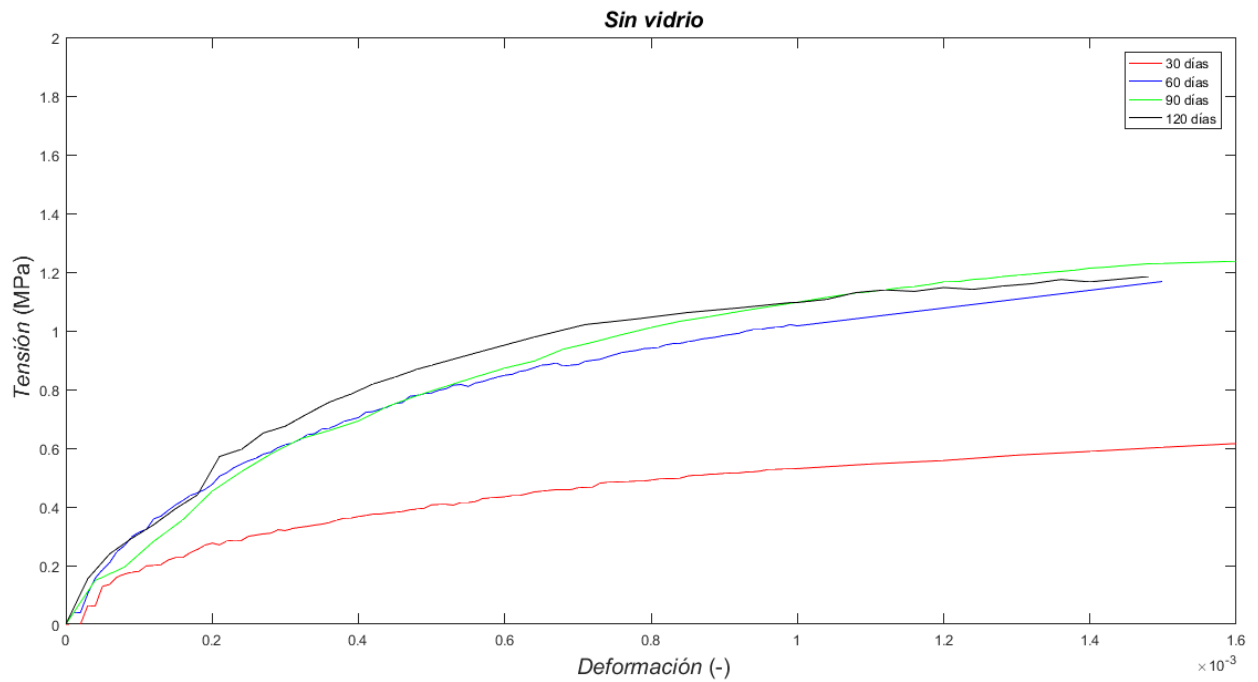


Figura 5.41. Gráfica tensión-deformación sin vidrio a todas las edades de secado

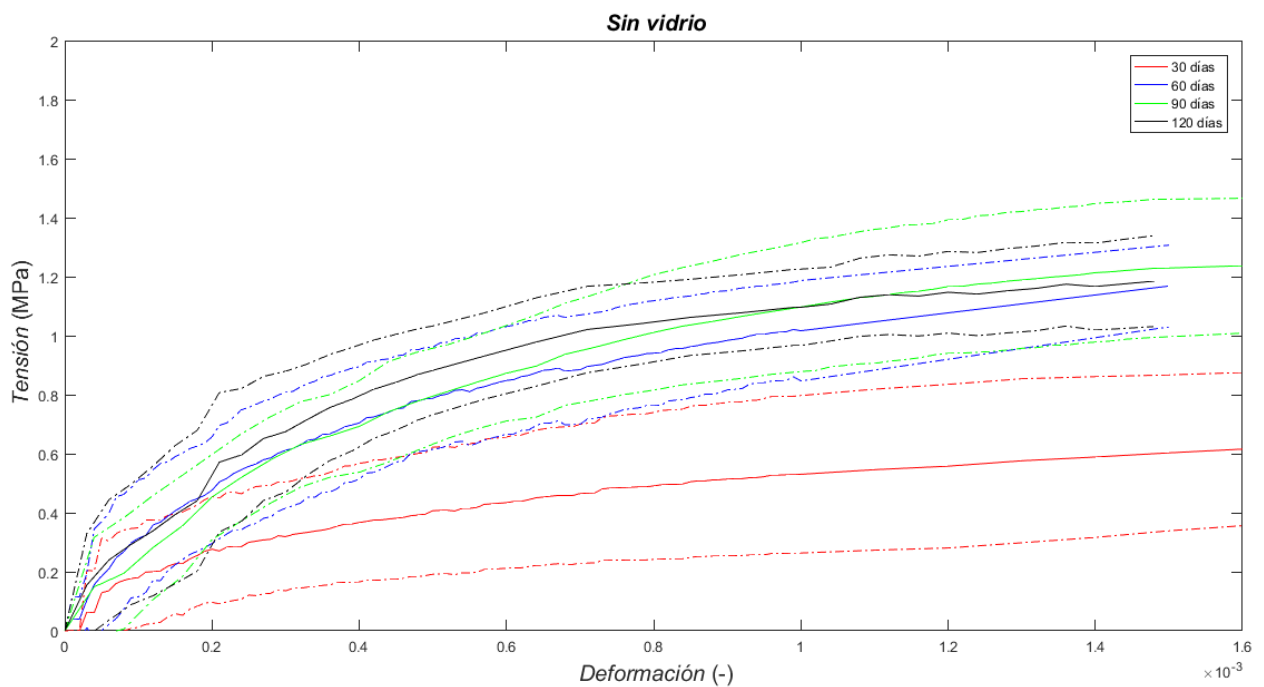


Figura 5.42. Gráfica tensión-deformación y desv. típica sin vidrio a todas las edades de secado

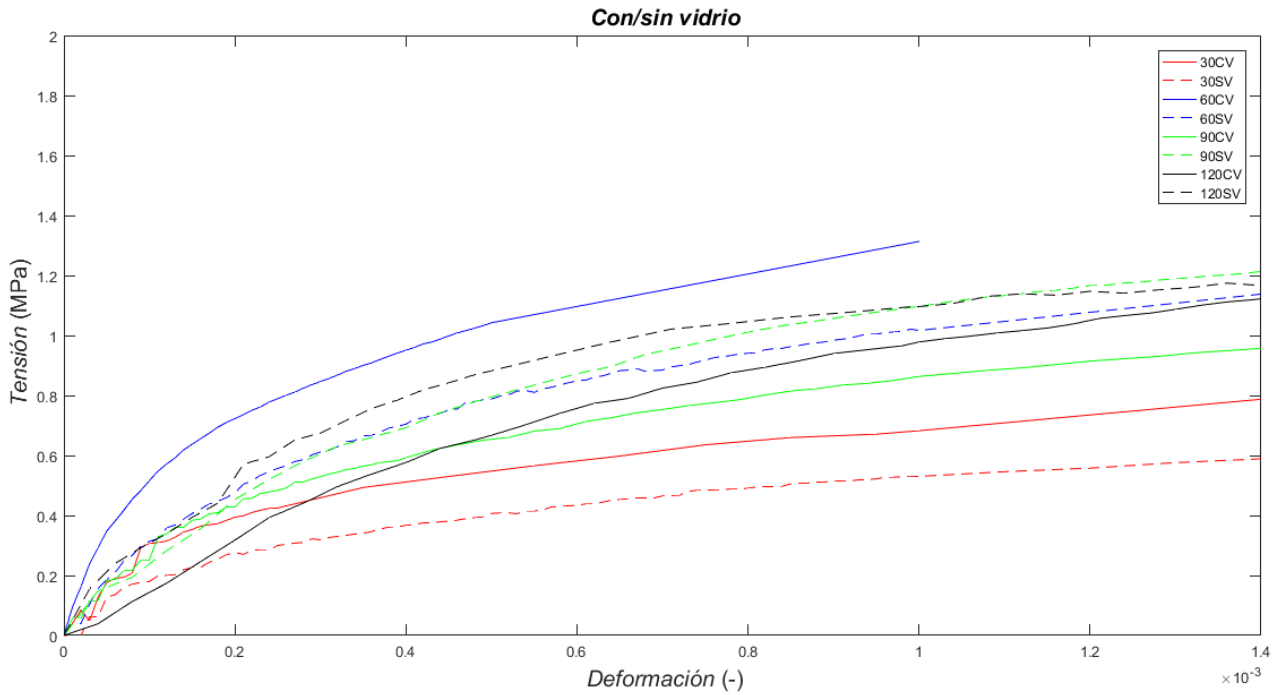


Figura 5.43. Gráfica tensión-deformación con/sin vidrio a todas las edades de secado

Comparando las Figuras 5.39-5.43, se observa una cierta normalización de la ley de comportamiento para ambos tipos de probetas y, especialmente, en las probetas sin vidrio para las curvas a los 60, 90 y 120 días de secado según se ve en la Figura 5.43. A su vez, la dispersión disminuye también para estas fechas de ensayos y en ambos tipos de probetas. Desde los 60 a los 120 días se observa una pequeña disminución gradual en la dispersión lo que puede ser debido mayormente al efecto de la edad de las probetas.

5.3 Tipo de rotura en las probetas

En la realización del ensayo destructivo a distintas edades de secado se comprobó que el estado de las probetas era un factor significativo en la forma de romper de las mismas. Más allá de la edad de secado influía el hecho de que la probeta ensayada presentase una falta de planeidad en su cara superior, que algunas de las esquinas estuviese erosionada o que algunas de las dos caras de contacto fuese excesivamente irregular. Las probetas con vidrio, como se ha mostrado en puntos anteriores del proyecto, presentaban una superficie menos lisa y con huecos más apreciables a simple vista que las probetas sin vidrio, lo que era significativo a la hora de entrar en contacto la probeta con el plato superior de la máquina de ensayo.

En este apartado se muestra la rotura de ambas tipologías de probetas en distintas edades de secado, lo que se relacionará en puntos posteriores con la resistencia a compresión obtenida en cada uno de los casos. La forma de romper de las probetas está asociada a la distribución de esfuerzos por la misma durante el proceso de carga y descarga.

5.3.1 Probetas 30 días



Figura 5.44. Probeta 30-CV-M4-P1-T antes/después ensayo a compresión



Figura 5.45. Probeta 30-CV-M3-P4-T antes/después ensayo a compresión

En las Figuras 5.42 y 5.43, se puede observar como existe una falta de paralelismo entre la cara superior e inferior en las dos probetas con vidrio ensayadas a 30 días de secado. Esta imperfección se ha traducido en una rotura diagonal no deseada y fuera del rango esperado en ambas probetas, donde parte de la misma se ha desprendido. Este tipo de rotura no solo se podría asociar a la falta de planeidad en la cara superior de ambas probetas, sino también al hecho de que no haya pasado el suficiente tiempo de secado como para que la tapia haya alcanzado el estado óptimo para ser cargada a compresión. En dos de las probetas con vidrio mostradas en las Figuras 5.42 y 5.43, en concreto aquellas que presentaban una pendiente más pronunciada en la cara superior, se produjo el tipo de rotura mostrada mientras que las cinco restantes rompieron de una forma más adecuada.



Figura 5.46. Probeta 30-SV-M3-P4-T antes/después ensayo a compresión

En el caso de las probetas sin vidrio a 30 días de secado, todas ellas rompieron de forma controlada, pero con grietas significativas y cierto desprendimiento de material en algunas de ellas. En la imagen anterior se puede apreciar que la probeta tiene una pendiente considerable en la parte superior aunque no rompe de la misma forma que las probetas con vidrio ya vistas.

Por lo tanto, al finalizar la primera tanda de ensayos destructivos correspondientes a los 30 días de secado, se observó que las probetas no llegaban a romper de la forma esperada lo que se asociaba directamente a las imperfecciones que presentaban ciertas probetas así como al poco tiempo de secado.

5.3.2 Probetas 60 días

Observando la gran influencia que habían tenido ciertas imperfecciones de las probetas a 30 días de secado en la forma de rotura, para los ensayos destructivos realizados a los 60 días se realizó el refrentado de las mismas. Los resultados obtenidos en rotura se muestran en las Figuras 5.45 y 5.46.



Figura 5.47. Probeta 60-CV-M1-P3-T antes/después ensayo a compresión



Figura 5.48. Probeta 60-SV-M4-P1-B después ensayo a compresión

En las Figuras 5.45 y 5.46 para dos probetas ensayadas a compresión en la tanda de 60 días de secado, se puede comprobar a simple vista las consecuencias del refrentado de las probetas. En el desarrollo de esta tanda, las probetas rompieron de forma más controlada produciéndose grietas difíciles de apreciar en algunos casos, lo que confirma positivamente el uso del refrentado. Por otro lado, la diferencia en la rotura no es significativa entre las probetas con y sin vidrio para este tiempo de secado.

5.3.3 Probetas 90 días



Figura 5.49. Probeta 90-CV-M4-P2-B antes/después ensayo a compresión



Figura 5.50. Probeta 90-SV-M1-P4-T antes/después ensayo a compresión

Las probetas ensayadas a 90 días de secado también fueron refrentadas lo que llevó en los ensayos a una rotura más adecuada y en la mayoría de los casos con grietas difícilmente de apreciar a simple vista. En esta tanda de ensayos también se observó una cierta tendencia a que las grietas de las probetas sin vidrio fuesen algo más acusadas que en el caso de las probetas con vidrio, lo que llevaba a un mayor desprendimiento de ciertas partes de la probeta.

5.3.4 Probetas 120 días



Figura 5.51. Probeta 120-CV-M2-P2-T antes/después ensayo a compresión



Figura 5.52. Probeta 120-SV-M1-P1-T antes/después ensayo a compresión

En las probetas ensayadas a 120 días de secado, las cuales también fueron refrentadas se confirmó el comportamiento observado en las probetas de 90 días: se produjeron roturas controladas, grietas con un grosor mínimo en la mayor parte de los casos y algo más significativas en las probetas sin vidrio. En concreto, para la probeta sin vidrio mostrada en la figura anterior sí se produjo una rotura fuera del comportamiento esperado según los resultados que se habían observado para otras probetas sin vidrio.

Como se ha observado, entre las distintas tandas de ensayos realizadas, la mayor diferencia se encuentra entre las probetas de 30 y 60 días de secado, cuya diferencia es el hecho de que las primeras no estaban refrentadas. Según las imágenes que se han mostrado en el presente punto y teniendo en cuenta la totalidad de los resultados de rotura obtenidos en el laboratorio, se puede confirmar en términos de rotura de las probetas de tapia que el refrentado ha llevado a una rotura más controlada como se ha podido comprobar en las probetas de 60, 90 y 120 días.

En general, tanto en las probetas con vidrio como sin vidrio se esperaban que rompiesen y se deformasen a partir de grietas verticales que recorriesen la probeta longitudinalmente y que, el límite entre tongadas, considerado como una región de la probeta de menor adherencia que la zona intermedia de cada una de ellas, no fuese una región dominante de rotura por efecto del deslizamiento entre tongadas ante una distribución no uniforme de esfuerzos.

Por lo tanto, la presencia de grietas notables en el límite entre tongadas o grietas horizontales eran signo de que la distribución de esfuerzos no estaba siendo la correcta así como la forma de romper de las mismas. Estas roturas se caracterizaban por un ensanchamiento de la probeta por efecto Poisson durante el proceso de carga final hasta el punto de rotura debido a la incorrecta distribución de esfuerzos, lo que llevaba a que rompiesen preferentemente por el límite entre tongadas. El comportamiento a flexión no era el realmente buscado en el desarrollo de los ensayos, aunque las construcciones con tapia pueden llegar a soportar cierto esfuerzo a flexión debido por ejemplo a la carga de viento, la cual habría que tener en cuenta, pero no es comparable a la carga a compresión. En puntos posteriores, se comprobarán los respectivos resultados de resistencia característica para cada una de ellas.

Estos resultados observados en la rotura están directamente relacionados con los valores de resistencia a compresión obtenidos, a su vez, podrían tener una influencia directa en la obtención de resistencias a compresión inferiores a las obtenidas si las probetas no presentasen dichas imperfecciones.

5.4 Análisis efecto edad

A la vista de los resultados obtenidos en la realización del ensayo a compresión simple, se procederá al análisis de los mismos relacionándolos no solo con el proceso de fabricación de las probetas o con la operación del refrentado sino también con el efecto de la edad. El objetivo es saber hasta que punto el aumento de los días de secado influye en el proceso de curado de las probetas y, a su vez, en el comportamiento mecánico de las mismas.

Para tener en cuenta el efecto de la edad sobre las probetas con y sin vidrio hay que analizar previamente dos factores fundamentales, los cuales dependen el uno del otro: las condiciones de humedad y temperatura y el grado de reacción de la cal hidráulica añadida a las probetas. Observando las gráficas de tensión-deformación y los resultados de resistencia a compresión, se pretende encontrar una justificación a la mejora progresiva de los resultados más allá del refrentado del cual ya se ha confirmado su influencia en el ensayo destructivo.

5.4.1 Condiciones de humedad y temperatura

Durante el proceso de curado de las probetas de tapia, se llevó a cabo un registro de las condiciones de humedad y temperatura de las cámaras donde se situaron. Mediante estos resultados, se podrán sacar conclusiones más concluyentes sobre el secado de las probetas y así relacionarlo con los valores obtenidos en los ensayos realizados.

La representación de las mediciones tomadas de humedad y temperatura se encuentran en el Anexo E del presente de puede observar a corto plazo que las condiciones de secado son estables, pero teniendo en cuenta que el curado de las probetas ha estado comprendido entre los meses de marzo y julio, si se puede observar cambios a largo plazo. Las condiciones de humedad muestran una tendencia descendente y, a su vez, la temperatura se ha ido incrementado. El conjunto de estas condiciones ha podido llevar a un secado considerable sobre todo para las probetas de 120 días, lo que se ha podido reflejar en los resultados obtenidos en el ensayo destructivo.

5.4.2 Carbonatación de la cal

En relación a los resultados obtenidos en los ensayos, la cal podría haber tenido cierta influencia sobre todo en los resultados de resistencia correspondientes a los 120 días de secado. Esto se debe a que el proceso de endurecimiento adicional provocado por la reacción de la cal hidratada con el dióxido de carbono del aire es muy lento y, solo después del paso de algunos meses, se puede comprobar un cierto aumento de la resistencia.

La prueba consistía en añadir una cierta cantidad de fenolftaleína mediante goteo, el cual reacciona con el contenido en cal de las probetas colorando la parte de estas que no ha reaccionado aún. Esto permite estimar un porcentaje aproximado de la cantidad de tapia con cal que ya ha reaccionado con el dióxido de carbono desde la parte externa hacia la interna de la probeta. Una vez se habían ensayado las probetas a compresión simple, se extraía la tongada superior e inferior de la misma y se les realizaba la prueba de carbonatación. El hecho de emplear la tongada superior y la inferior y no considerar la tongada intermedia era comprobar si la gravedad afectaba de cierta manera al proceso de reacción de la cal, así como a las condiciones de humedad en dirección longitudinal de la probeta.

Con el objetivo de comprobar el porcentaje de probeta cuyo contenido en cal ya había reaccionado, se sometió a las probetas ensayadas a los 120 días a una prueba para comprobar el estado de la carbonatación. Se realizó esta prueba a un total de 6 probetas de las cuales 3 eran con vidrio y 3 sin vidrio, las cuales eran semejantes entre ellas ya que se habían compactado en la misma posición en el molde solo que una llevaba vidrio y la otra no. A continuación, se muestra el resultado obtenido en una probeta con vidrio (Figura 5.53) y sin vidrio (Figura 5.54).



Figura 5.53. Prueba de carbonatación, probeta CV-120-M1-P1-T



Figura 5.54. Prueba de carbonatación, probeta SV-120-M3-P3-T

La zona coloreada es la parte de la probeta que aún no ha reaccionado y cuyas medidas se recogen en la Tabla 5.6 tanto para la tongada superior como la inferior.

Probeta 120 días				
Probeta	Con vidrio		Sin vidrio	
	Top	Bottom	Top	Bottom
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

Tabla 5.6. Medidas zona no carbonatada en probetas de 120 días

Los resultados son semejantes entre las 3 probetas expuestas tanto con vidrio como sin vidrio. Comparando las tongadas superiores de las probetas con vidrio con las tongadas inferiores se puede observar que estas últimas son ligeramente inferiores a las primeras. Por otro lado, en las probetas sin vidrio ocurre todo lo contrario. Teniendo en cuenta que la medida de la sección transversal de la probeta es de 100 mm, se puede comprobar que a los 120 días de secado y después de las condiciones de humedad y temperatura registradas, no ha reaccionado entre el 50 y el 60% de la cal añadida a las probetas.

6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Teniendo en cuenta todo el proceso seguido en el proyecto desde el planteamiento de las tandas de fabricación hasta la realización de los ensayos, en este apartado se analizan los resultados obtenidos así como las conclusiones que se han ido planteando durante todo el proyecto. El objetivo principal es comprobar si la adición del vidrio reciclado a las probetas ha modificado las prestaciones mecánicas de la tapia y, en ese caso, si ha supuesto o no una cierta mejora. Para ello, se plantea un resumen del proyecto que se ha llevado a cabo a partir del cual se sacan las conclusiones mostradas en el apartado siguiente. Por último, teniendo en cuenta los resultados obtenidos así como la línea de investigación a la que pertenece el presente proyecto, se plantean algunas modificaciones del mismo en el caso de que vuelva a ser realizado y una serie de investigaciones alternativas las cuales podrían continuar el trabajo ya realizado.

6.1 Resumen del alcance del proyecto

Tal y como se mencionó al principio del proyecto, el desarrollo y ejecución del mismo persigue un doble objetivo: la reutilización de un material como el vidrio en la tapia, el cual se desecha en grandes cantidades en la sociedad actual y la comprobación de que este mejora el comportamiento mecánico a compresión de la tapia. A su vez, también se contribuye a una amplia línea de investigación, la cual no solo brinda una posible salida a materiales sin uso como en este caso el vidrio, sino que persigue el desarrollo de una normativa reguladora para las construcciones con tapia como las normas ya existentes para materiales como el hormigón o el acero.

Teniendo en cuenta la fragilidad de las probetas de tapia durante su manejo, se fabricaron probetas prismáticas y de un tamaño reducido con el objetivo de facilitar su manejo durante los ensayos. La granulometría empleada para la fabricación de la tapia fue semejante a las proporciones empleadas hace cientos de años, pero con el añadido de la cal y, a la mitad de las fabricadas, también del vidrio. Esta adición se basa en una sustitución parcial al 75% como resultado del método de Fuller empleado para distintos porcentajes de vidrio sustituidos en la mezcla original. Los tipos de vidrio empleados son dos: un vidrio grueso cumpliendo una función parecida a la grava y un vidrio medio asemejándose a la arena. Seguidamente, para el proceso de mezclado y posterior fabricación fue fundamental encontrar la humedad óptima mediante el ensayo Próctor Normal.

A continuación, se realizó la fabricación de las probetas mediante un molde de metacrilato y un martillo percutor aligerando así el proceso de forma significativa. Este se planificó de forma exhaustiva entre el grupo de trabajo para no pasar por alto ninguna de las variables presentes en el proceso como: la compactación, la humedad en la mezcla, las cantidades añadidas, el manejo del molde o identificación de las probetas. Este último aspecto fue fundamental para el desarrollo de las tandas de ensayo, así como para relacionar los resultados obtenidos con la posición donde se habían compactado las probetas.

Una vez se habían fabricado las probetas se colocaron para su secado y con su respectiva identificación teniendo en cuenta la parte del molde donde se había fabricado y la fecha en la que se iba a ensayar. En total se fabricaron 58 probetas distribuidas en cuatro tandas de ensayos a los 30, 60, 90 y 120 días de secado.

Se realizaron un total de dos ensayos a cada una de las probetas fabricadas: ensayo de ultrasonidos y ensayo a compresión simple. La realización de ensayos se llevó a cabo de forma conjunta entre todo el grupo de trabajo aunque los resultados del ensayo de ultrasonidos fueron analizados e interpretados por mi compañero de proyecto Joseba García Román y, los resultados del ensayo mecánico a compresión, son los expuestos en el presente proyecto. Para este ensayo destructivo se empleó un sistema de vídeoextensometría mediante el cual se leía la deformación relativa de las probetas a compresión mediante unos patrones colocados en las mismas y relacionaban estas mediciones con la fuerza a compresión ejercida por la máquina de ensayo.

Los aspectos fundamentales medidos durante el ensayo destructivo fueron: el tipo de rotura de las probetas, la resistencia a compresión y los resultados de fuerza a compresión y deformación. Tras la realización de las cuatro tandas de ensayos, estos aspectos iban a revelar el grado de influencia de la cal, del vidrio y del tiempo de secado sobre las probetas de tapia ensayadas. Durante el desarrollo de los ensayos, entre los 30 y 60 días de secado, se decidió realizar el refrentado para las probetas a ensayar a los 60, 90 y 120 días debido a que la tanda correspondiente a los 30 días de secado presentaba una pendiente acusada en la cara superior de las probetas.

Dentro del ensayo mecánico se buscaba conocer la evolución de la resistencia a compresión a través de la distintas edades de secado de las probetas. A partir de los datos registrados en los ensayos se procedió a su análisis mediante Matlab con el objetivo de representar las curvas de tensión-deformación de cada una de las probetas. Estas curvas se representaron según distintos tipos de criterios, aunque las gráficas más relevantes son aquellas en la que se comparan los resultados del sistema de vídeo extensometría en una misma fecha de secado tal y como se señala en el apartado 5.2 del presente proyecto. Entre estas curvas se descartaron mediante criterio visual aquellas que mostraban un comportamiento fuera de lo esperado. Por último, se obtuvieron mediante Matlab las curvas promedio, la desviación típica, el máximo y el mínimo para cada fecha de ensayo.

Para cerrar el proyecto realizado y poder relacionar las conclusiones sacadas con los resultados obtenidos del análisis de los resultados de los ensayos, se sacaron las condiciones de humedad y temperatura de las cámaras donde se secaron las probetas con el objetivo de relacionar cualquier posible anomalía a las condiciones de secado ya que son determinantes en la definición de la resistencia mecánica de la tapia. A su vez, se les realizó una prueba de carbonatación a las probetas ensayadas a los 120 días de secado para ver la evolución de la reacción de la cal contenida en las probetas.

6.2 Conclusiones sobre resultados de los ensayos

Para cerrar el proyecto presentado, se exponen a continuación las **conclusiones metodológicas y procedimentales**.

1. En el proceso de preparación de la mezcla con vidrio, se plantearon distintos porcentajes de sustitución entre la arena y este material. Para ello, se realizó un **estudio granulométrico del vidrio con el método de Fuller**, el cual reveló que la sustitución óptima para la adición del vidrio a la tapia es del 75%.
2. Para la realización de la mezcla de fabricación, el **porcentaje de humedad óptima** teórica obtenida mediante el Ensayo Próctor Normal del 12% no coincidió con el grado de humedad óptima del 8% obtenido tanto para la mezcla con vidrio como sin vidrio, la cual se comprobó mediante la textura y apariencia de ambas mezclas.
3. En cuanto a la **forma de las probetas**, estas se realizaron prismáticas y con unas dimensiones que permitiesen no solo realizar los ensayos correctamente sino también manejarlas con facilidad. Aún así, el manejo de la tapia mostraba una apreciable debilidad ya que se desprende cierta cantidad de finos e incluso grava que se encuentra en la capa externa y, a su vez, también eran frágiles las esquinas.

4. En la primera tanda de ensayos se observó una **gran diferencia visual entre las probetas con vidrio y las probetas sin vidrio**. La porosidad y la densidad aparente eran similares para ambos tipos de probetas, por lo que se descartó su influencia sobre el aspecto de las mismas. Con todo esto, considerando que la granulometría y el porcentaje de vidrio son los mismos para ambas tipologías, se considera que esta diferencia se debe a la modificación del proceso de adición de componentes en la mezcladora para las probetas con vidrio.
5. Con el **empleo del martillo percutor** en el proceso de fabricación de las probetas, se redujo el coste temporal del proceso y se mejoró el resultado esperado realizando una compactación más uniforme. Este concepto era determinante en la posterior respuesta mecánica de las probetas.
6. La presión ejercida por el martillo percutor no siempre fue totalmente perpendicular al plano donde estaba contenida la mezcla a compactar en el molde, lo que se tradujo en que la mayor parte de **las probetas presentaban una falta de planeidad en la cara superior**.
7. La pendiente de las probetas dió lugar a una distribución de esfuerzos no uniformes. Esto llevaba a un cierto deslizamiento en el límite entre tongadas, al ser estas, las zonas de la probeta que presentan una menor adherencia. Para corregir todos estos problemas y obtener unos resultados en resistencia cercanos a la realidad se llevó a cabo el **refrentado de las probetas**.

Atendiendo a la evolución de los resultados en resistencia a lo largo de las distintas fechas de secado mostrados en las figuras 5.1-5.13 y en las tablas numéricas del anexo B del presente proyecto se llegan a las **conclusiones en resistencia**.

1. **A los 30 días de secado** existe una dispersión significativa entre los resultados obtenidos. La resistencia promedio de las probetas con vidrio es ligeramente superior a las probetas sin vidrio.
2. **Entre los 30 y los 60 días de secado**, se observa una diferencia notable entre los resultados obtenidos de resistencia ya que esta aumenta en ambos tipos de probetas entre un 30 y un 40% en su valor promedio. Por otro lado, la dispersión disminuye entre ambas fechas. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para fechas de ensayos posteriores, la diferencia en resistencia entre los 30 y 60 días se debe al refrentado de las probetas más que al secado de las mismas o al efecto de la cal. Se observa que la dispersión de las probetas sin vidrio se mantiene constante mientras que en las probetas con vidrio aumenta en torno a un 22% respecto a los valores a los 30 días.
3. **Entre los 60 y los 90 días de secado**, se comprueba que la dispersión disminuye en un 26% para las probetas con vidrio y en un 30% en las probetas sin vidrio. Esto se considera en mayor medida como una consecuencia del secado de las probetas ya que las probetas de ambas fechas de ensayo están refrentadas. La resistencia promedio entre las probetas de 60 y 90 días se mantiene semejante tanto para las probetas con vidrio como sin vidrio.
4. **Entre los 90 y 120 días de secado**, se confirma la tendencia descendente en el valor de la dispersión para los valores de resistencia obtenidos. En el caso de las probetas con vidrio disminuye en un 30% mientras que en las probetas sin vidrio en un 56%, obteniendo así un descenso más acusado que el observado entre las probetas de 60 y 90 días. En términos de resistencia, se observa que en el caso de las probetas sin vidrio la resistencia promedio se mantiene semejante mientras que en las probetas con vidrio se produce un aumento en un 27%.
5. El **aumento notable en la resistencia para las probetas con vidrio ensayadas a los 120 días** no se puede deber al efecto de la cal ya que se hubiesen mostrado mayores valores en resistencia también para las probetas sin vidrio, ni tampoco al efecto del refrentado ya que las dos tandas anteriores de probetas también habían sido refrentadas. Por lo tanto, se asocia mayormente a la edad y condiciones de secado ya que según los resultados obtenidos en las condiciones de humedad y temperatura en el Anexo E, estas últimas probetas han estado expuestas a una temperatura media elevada y a una mínima humedad durante unos 15 días aproximadamente. Esto junto con la presencia del vidrio en las probetas han derivado en un aumento de la resistencia a compresión de la tapia.

Se llegan a las siguientes **conclusiones según las curvas tensión-deformación** para las distintas fechas de ensayos mostradas en las figuras 5.15-5.41.

1. **De los 30 a los 120 días de secado**, se observa una disminución de la dispersión de forma progresiva desde las representadas a los 30 hasta los 120 días.
2. **A los 30 días de secado**, se observa para ambos tipos de probetas que el número de curvas válidas es reducido y más aún para las probetas sin vidrio comprobándose que son irregulares y que la mayoría de ellas no presentan una zona elástica definida. Como consecuencia, se obtiene una alta dispersión y una curva promedio irregular para ambos tipo de probetas y tanto en la gráfica 5.16 (con vidrio) como en la 5.19 (sin vidrio), se observa una cierta zona de fluencia. Todos estos resultados no deseados se deben a la pendiente que presentan las probetas ensayadas.
3. **A los 60 días de secado**, se llevó a cabo el refrentado para ambos tipos de probetas. Debido a esto, se observa un mayor número de curvas válidas para la obtención de la curva promedio. Como consecuencia, esto lleva a la obtención de una curva promedio más regular y de una menor dispersión en los resultados lo que normaliza el comportamiento de las probetas. A su vez, el comportamiento de las probetas con vidrio es ligeramente mejor que para las probetas sin vidrio.
4. **A los 90 días de secado** no se observa una gran diferencia en los resultados obtenidos respecto a los 60 días. En este tiempo de secado, la dispersión para las probetas con vidrio es ligeramente inferior que para las probetas sin vidrio. Se puede deducir que el refrentado puede tener una mayor influencia sobre el comportamiento de las probetas y la normalización de la relación tensión-deformación que el aumento de los días de secado.
5. **A los 120 días de secado** no se observa una diferencia significativa con los resultados a los 60 y 90 días, por lo que se puede confirmar que el refrentado tiene un mayor efecto en la normalización de la relación tensión-deformación que el aumento de los días de secado, lo que puede influir mayormente en una disminución progresiva de la dispersión desde los 60 a los 120 días donde todas las probetas están refrentadas
6. Comparando las **gráficas 5.39-5.43 con y sin vidrio entre las distintas fechas de secado**, se observa una cierta normalización de la ley de comportamiento y disminución de la dispersión para ambos tipos de probetas con el efecto de la edad debiéndose principalmente al refrentado. Esto se confirma observando la gran dispersión que presentan las curvas a los 30 días en comparación con las posteriores fechas de ensayo. La disminución gradual de la dispersión entre los 60 y 120 días se puede deber al efecto de la edad, el cual afecta en menor medida en comparación con el refrentado. Por último, según la gráfica 5.43, el vidrio no presenta una ventaja aparente en la ley de comportamiento, mostrando las probetas sin vidrio un mayor grado de normalización entre los 60 y 120 días.

6.3 Desarrollos futuros

Para la realización de futuras campañas de ensayo en torno a la tapia se plantean una serie de alternativas así como cambios deducidos de la realización del presente proyecto.

1. Con el objetivo de observar la **evolución de la resistencia de las probetas** así como de los datos de tensión-deformación obtenidos mediante el ensayo a compresión de las mismas, se plantea la realización de probetas de tapia con vidrio incorporado, pero **ensayadas a mayores edades de secado**, como por ejemplo, a los 150 y 180 días.
2. Realizar la **prueba de carbonatación** en todas las fechas de ensayo, con el propósito de observar cómo reacciona la cal con el aumento de la edad de secado y evaluar su influencia en las prestaciones mecánicas de la tapia.
3. Sería objeto de interés también la posibilidad de realizar este mismo proceso de fabricación y ensayos de probetas de tapia, pero con unas **proporciones ligeramente distintas** o con **probetas cilíndricas** cuyos resultados se pudiesen comparar con las probetas prismáticas ensayadas para este proyecto.

4. Como parte fundamental de una posible variante al proyecto expuesto se podría profundizar en el **procedimiento de fabricación** de tal forma que se optimizase el tiempo empleado en la operación. A su vez, emplear maquinaria adaptada al molde donde se va a compactar evitando así posibles problemas de imperfecciones en las probetas.
5. Como variante a este proyecto, se podrían **emplear otros materiales** que puedan mejorar las prestaciones mecánicas de la tapia. De esta forma, a la vez que se persigue la elaboración de una normativa reguladora para esta técnica de construcción, se pueden aprovechar ciertos materiales reciclados o desechados en la actualidad impulsando así el carácter medioambiental que también destaca a esta línea de investigación.

ANEXO A

En este primer anexo se encuentran las tablas de datos correspondientes a los resultados obtenidos en las pruebas de densidad y porosidad realizadas a las probetas con y sin vidrio ensayadas a los 90 días de secado, en el departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la ETS de Ingeniería de la Edificación en Sevilla. En primer lugar, se encuentran los datos obtenidos para las probetas con vidrio y, a continuación, los datos para las probetas sin vidrio. Las gráficas basadas en estos resultados se encuentran en el apartado 3.4.

Muestra	Peso seco (gr)	Peso sumergido (gr)	Peso Saturado (gr)	D real (gr/cm³)	D aparente (gr/cm³)	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%

Tabla 0.1. Densidad aparente y porosidad probetas con vidrio 90 días

Muestra	Peso seco (gr)	Peso sumergido (gr)	Peso Saturado (gr)	D real (gr/cm³)	D aparente (gr/cm³)	Porosidad (%)
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%

Tabla 0.2. Densidad aparente y porosidad probetas sin vidrio 90 días

ANEXO B

En este anexo se recogen las tablas de datos en resistencia obtenidos a partir del ensayo mecánico a compresión para las probetas con y sin vidrio a 30, 60, 90 y 120 días de secado. A través de estos datos se ha realizado el cálculo de la resistencia promedio y la desviación típica y, a su vez, se ha obtenido el valor de la resistencia característica a compresión para cada fecha de ensayo. Mediante estos resultados se han elaborado las gráficas expuestas en el apartado 5.2.

Probetas	Resist. Comp. (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación típica
M4-P1-T	0,682		
M2-P2-B	1,316		
M3-P4-T	0,687		
M3-P3-B	1,192	0,923	0,244
M1-P1-B	0,808		
M2-P3-T	0,856		
M1-P2-T	0,921		

Tabla 0.1. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 30 días con vidrio

Probetas	Resist. Comp. (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación típica
M1-P2-T	0,44		
M2-P2-B	0,947		
M3-P4-T	0,698		
M3-P4-T	0,618	0,791	0,228
M3-P3-B	1,135		
M1-P1-B	0,86		
M2-P3-T	0,837		

Tabla 0.2. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 30 días con vidrio

Probetas	Resist. Comp. (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación típica
M3-P4-B	1,284		
M2-P4-T	1,692		
M1-P2-B	1,064		
M1-P3-T	1,558		
M4-P2-T	1,234	1,408	0,309
M4-P1-B	0,97		
M2-P3-B	1,746		
M3-P1-T	1,714		

Tabla 0.3. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 60 días con vidrio

Probetas	Resist. Comp. (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación típica
M3-P4-B	1,593		
M2-P4-T	1,31		
M1-P2-B	1,461		
M1-P3-T	1,672		
M4-P2-T	1,421	1,445	0,23
M4-P1-B	1,439		
M2-P3-B	0,977		
M3-P1-T	1,69		

Tabla 0.4. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 60 días sin vidrio

Probetas	Resist. Comp. (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación típica
M4-P2-B	1,224		
M1-P3-B	0,983		
M1-P4-T	1,578		
M3-P2-T	1,444	1,41	0,227
M2-P4-B	1,487		
M2-P1-T	1,566		
M3-P1-B	1,591		

Tabla 0.5. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 90 días con vidrio

Probetas	Resist. Comp. (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación típica
M3-P4-B	1,197		
M2-P4-T	1,504		
M1-P2-B	1,439		
M1-P3-T	1,62	1,412	0,159
M4-P2-T	1,264		
M4-P1-B	1,416		
M2-P3-B	1,593		
M3-P1-T	1,261		

Tabla 0.6. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 90 días sin vidrio

Probetas	Resist. Comp. (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación típica
M1-P1-T	1,92		
M2-P2-T	2,083		
M3-P3-T	1,747		
M1-P4-B	1,782	1,937	0,157
M3-P2-B	1,947		
M2-P1-B	2,142		

Tabla 0.7. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 120 días con vidrio

Probetas	Resist. Comp. (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación típica
M1-P1-T	1,396		
M2-P2-T	1,547		
M3-P3-T	1,365		
M1-P4-B	1,454	1,417	0,071
M4-P3-B	1,362		
M3-P2-B	1,448		
M2-P1-B	1,346		

Tabla 0.8. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 120 días sin vidrio

ANEXO C

En el siguiente anexo se presenta un diagrama de procesos indicando la metodología de trabajo seguida a la hora de realizar el análisis e interpretación de datos de los resultados obtenidos a todas las edades de secado del ensayo mecánico a compresión mediante el uso de Matlab. Seguidamente, a modo de ejemplo, se encuentra el código de Matlab desarrollado y empleado para la obtención de las gráficas tensión-deformación a los 90 días de secado para las probetas con vidrio. Este código sería semejante al código de las probetas sin vidrio donde solo habría que cambiar los datos de entrada y, a su vez, no habría prácticamente cambio alguno respecto a los códigos desarrollados para los 30, 60 y 120 días. Mediante estos códigos se obtuvieron las curvas de todas las probetas ensayadas durante las distintas etapas de ensayo y, a partir de estas, los valores promedio, desviación típica, máximos y mínimos. Las gráficas basadas en estos resultados se encuentran en el apartado 5.2.

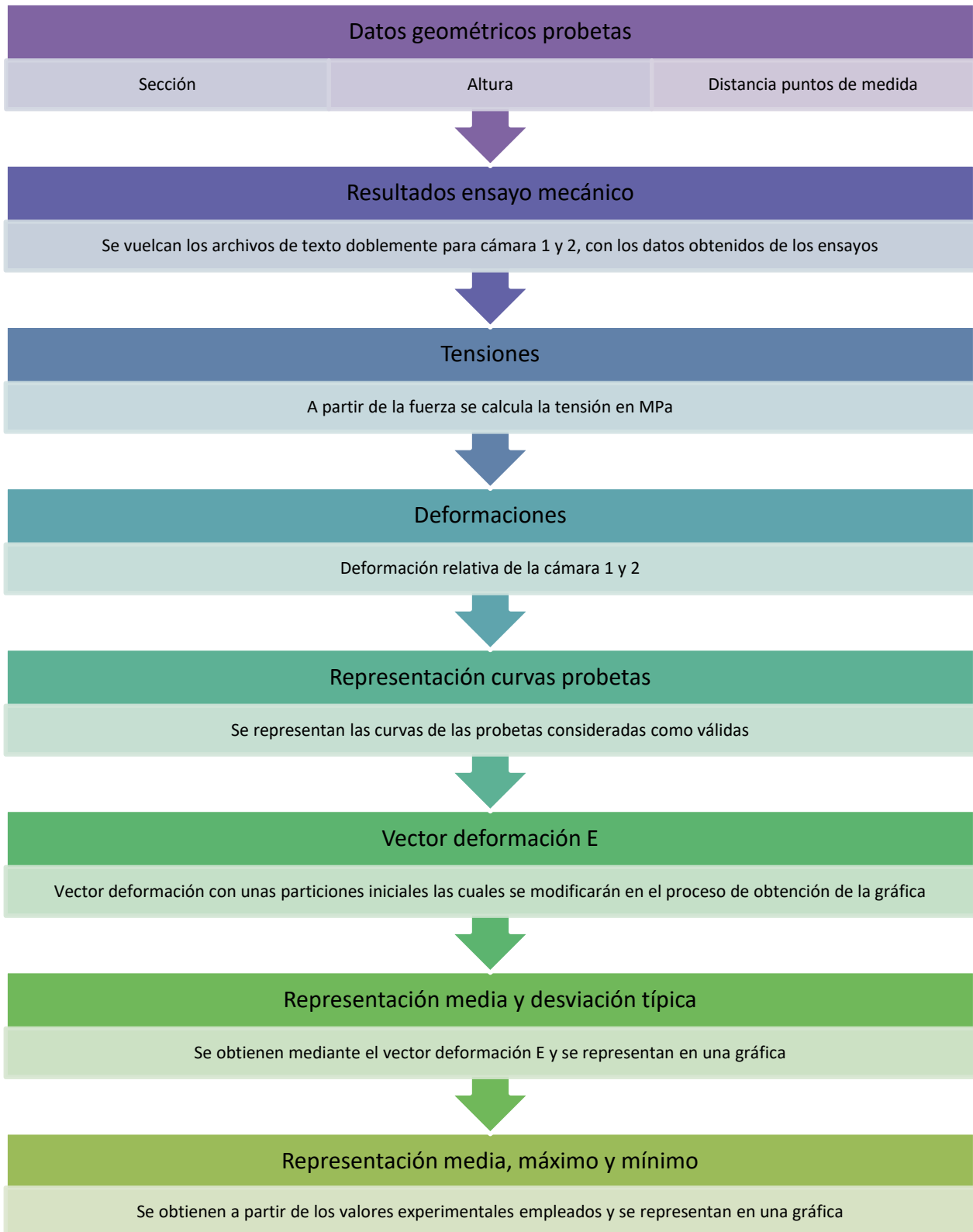


Tabla 0.1. Resistencia a compresión simple, promedio y desviación típica, probetas 120 días sin vidrio

```

clc; clear all; close all;

% Seccion
S = 0.01;      % [m2]
% Altura
H = 0.15;     % [m]
% Distancia puntos de medida
L0 = 0.05;    % [m]

% Vector deformación E con particiones adaptadas
E = [0:1e-5:4e-4,4e-4:3e-5:1e-3,1e-3:4e-5:1.5e-3]; % Strain rank

% Vector donde se indica el final de cada gráfica seleccionada
fin = [243,348,0,0,280,285,0,245,0,310,285,294,287,263];

% Para el cálculo de máximos, mínimos, media y desviación típica
iii = [1,2,5,6,8,10,11,12,13,14];

% La camara nos da delta de L y solo hay que dividirlo entre 50

% Tendremos deformacion para cada camara, es decir, la 1 y la 2
% para una probeta, una curva tensión deformacion para la camara 1 y otra
% curva para la camara 2 -> deltaL/L

% La camara da directamente deltaL

% Asignación probetas las cuales se duplican con el objetivo de rescatar
% los datos de la cámara 1 (C1) y los datos de la cámara 2 (C2) para el
% duplicado

probeta{1} = '90_1_CVM4P2_B.Txt'; % 1 C1
probeta{2} = '90_2_CVM1P3_B.Txt'; % 2 C1
probeta{3} = '90_3_CVM1P4_T.Txt'; % 3 C1
probeta{4} = '90_4_CVM3P2_T.Txt'; % 4 C1
probeta{5} = '90_5_CVM2P4_B.Txt'; % 5 C1
probeta{6} = '90_6_CVM2P1_T.Txt'; % 6 C1
probeta{7} = '90_7_CVM3P1_B.Txt'; % 7 C1
probeta{8} = '90_1_CVM4P2_B.Txt'; % 8 C2
probeta{9} = '90_2_CVM1P3_B.Txt'; % 9 C2
probeta{10} = '90_3_CVM1P4_T.Txt'; % 10 C2
probeta{11} = '90_4_CVM3P2_T.Txt'; % 11 C2
probeta{12} = '90_5_CVM2P4_B.Txt'; % 12 C2
probeta{13} = '90_6_CVM2P1_T.Txt'; % 13 C2
probeta{14} = '90_7_CVM3P1_B.Txt'; % 14 C2

prob = 1:7; % para la representación de f_c

color = 'bmcrgkyx';

% Carga de archivos SV
for i = 1:14
    data{i} = load(probeta{i});
end

```

```

% ----- FUERZAS Y POSICIONES -----

% Fuerzas máximas y sus posiciones para SV
for i = 1:7
    FSV{i} = data{i}(:,2)*1e3; % [kN] -> [N]
    F_maxSV(i) = max(FSV{i}); % [N]
    DPos_maxSV(i) = find (FSV{i} == F_maxSV(i),1,'first');
end

% ----- TENSIONES -----

% Tensiones SV
for i = 1:14
    FSV{i} = data{i}(:,2)*1e3; % [kN] -> [N]
    sigmaSV{i} = (1e-6.*FSV{i})./0.01; %[N/m2] -> [MPa]
end

% ----- DEFORMACIONES CÁMARA 1 Y 2 -----

% Deformaciones SV
for i = 1:7
    DefSV{i} = data{i}(:,5)./50; % [-]
end

for i = 8:14
    DefSV{i} = data{i}(:,6)./50; % [-]
end

% Gráficas cambiadas de signo

% -----

% GRÁFICA TENSION-DEFORMACIÓN - CON VIDRIO - CÁMARA 1-CÁMARA 2
figure(1)
hold on

for i = [1,2,5,6,8,10,11,12,13,14]
    dataSV{i}(:,1) = DefSV{i}(1:fin(i),1)-DefSV{i}(1,1);
    dataSV{i}(:,2) = sigmaSV{i}(1:fin(i),1)-sigmaSV{i}(1,1);
    [EE,ii] = unique(dataSV{i}(:,1));
    dataSV{i} = dataSV{i}(sort(ii),:);
    for jj=1:length(dataSV{i}(:,1))-1
        dif1{i}(jj) = dataSV{i}(jj+1,1) - dataSV{i}(jj,1);
    end

    for jj=length(dif1{i}):-1:1
        if dif1{i}(jj) <= 0
            dataSV{i}(jj+1,:)=[];
        end
    end
    xlabel('\it Deformación (-)', 'FontSize',15)
    ylabel('\it Tensión (MPa)', 'FontSize',15)
    title('\it Cámara 1, CV', 'FontSize',15)
    plot(dataSV{i}(:,1),dataSV{i}(:,2))
end

title('CV 90 C1 y C2')

```

```

legend('1-C1-M4P2B','2-C1-M1P3B','5-C1-M2P4B','6-C1-M2P1T',...
       '1-C2-M4P2B','3-C2-M1P4T','4-C2-M3P2T','5-C2-M2P4B','6-C2-M2P1T','7-C2-
M3P1B')

xlabel('\it Deformación (-)','FontSize',15)
ylabel('\it Tensión (MPa)','FontSize',15)

% Interpolación
for i = [1,2,5,6,8,10,11,12,13,14]
    for ii = 1:length(E) % Se interpola mediante vector deformación E
        T(ii,i) = interp1(dataSV{i}(:,1),dataSV{i}(:,2),E(ii),'nearest');
    end
end

for k = 1:length(E)
    t = T(k,iii);

    if any(isnan(t))
        [rr,pos] = find(isnan(t));
        t(pos) = [];
    end

    Tmed(k) = mean(t); % Media
    Tstd(k) = std(t); % Desviación típica

    Tmax(k) = max(t); % Máximo
    Tmin(k) = min(t); % Mínimo
end

figure(2) % Gráfica media y desviación típica
TM = plot(E,Tmed,'g');
hold on
SM = plot(E,Tmed+Tstd,'r');
SM1 = plot(E,Tmed-Tstd,'r');
hold off
title('CV 90 Media y Desv. Típica')
xlabel('Deformación (-)')
ylabel('Tensión (MPa)')
legend([TM,SM],'Media','Desvi.Típica (+/-)')
axis ([ 0 E(end) 0 2 ])

figure (3) % Gráfica media, máximo y mínimo
for i = [1,2,5,6,8,10,11,12,13,14]
    TE = dataSV{i}(:,2); % N
    EE = dataSV{i}(:,1); % mm
    ED = plot(EE,TE,'.-','color',gris(7,:)); %Valores experimentales
    hold on
end

MV = plot(E,Tmed,'r');
MaxV = plot(E,Tmax,'b');
MinV = plot(E,Tmin,'b');
title('CV 90 Media, Máximo y Mínimo')
legend([ED,MV,MaxV],'Valores Exp.','Media','Max-Min')
xlabel('Deformación (-)')
ylabel('Tensión (MPa)')
axis ([ 0 E(end) 0 2 ])

```

ANEXO D

En este último anexo se encuentran las curvas tensión-deformación representadas según la fecha de secado, según la cámara del sistema de vídeo extensometría que mide la deformación y si la probeta ensayada tiene vidrio o no. Estas son las mismas gráficas que las expuestas en el apartado 5.2, pero clasificadas de distinta forma, las cuales se han considerado como gráficas complementarias.

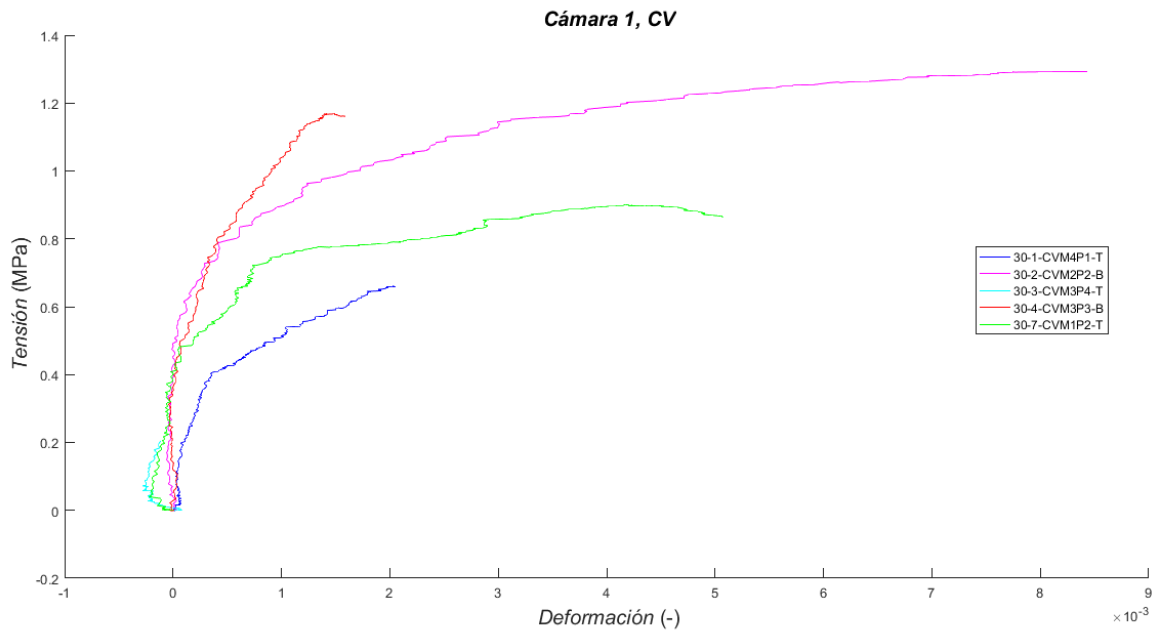


Tabla 0.1. Curvas tensión-deformación cámara 1, probetas 30 días con vidrio

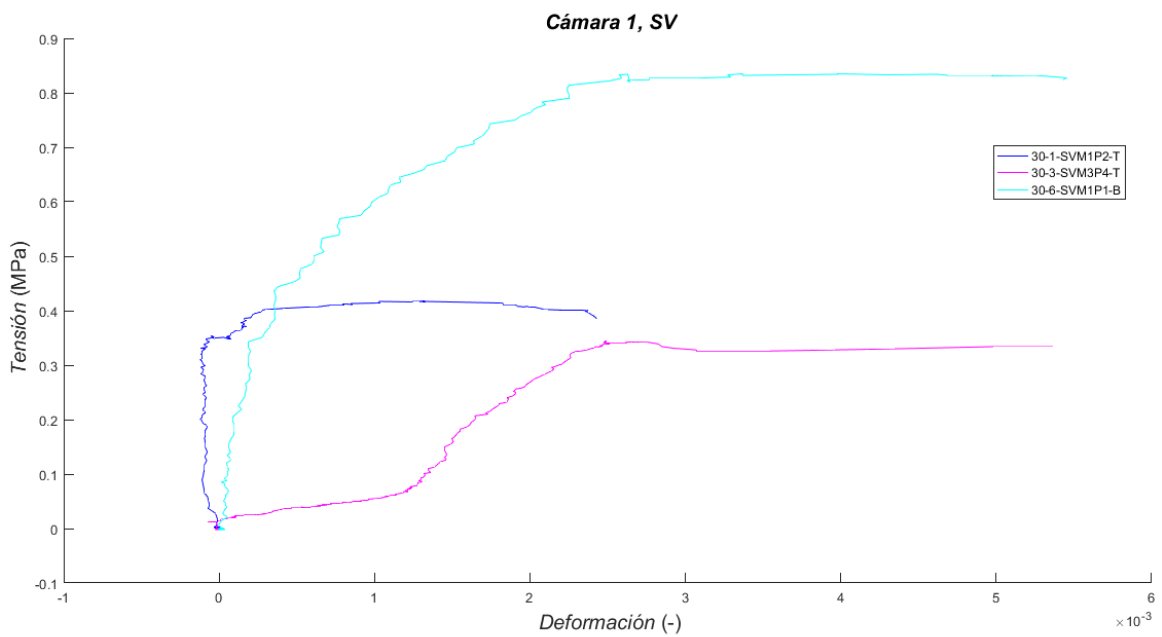


Tabla 0.2. Curvas tensión deformación cámara 1, probetas 30 días sin vidrio

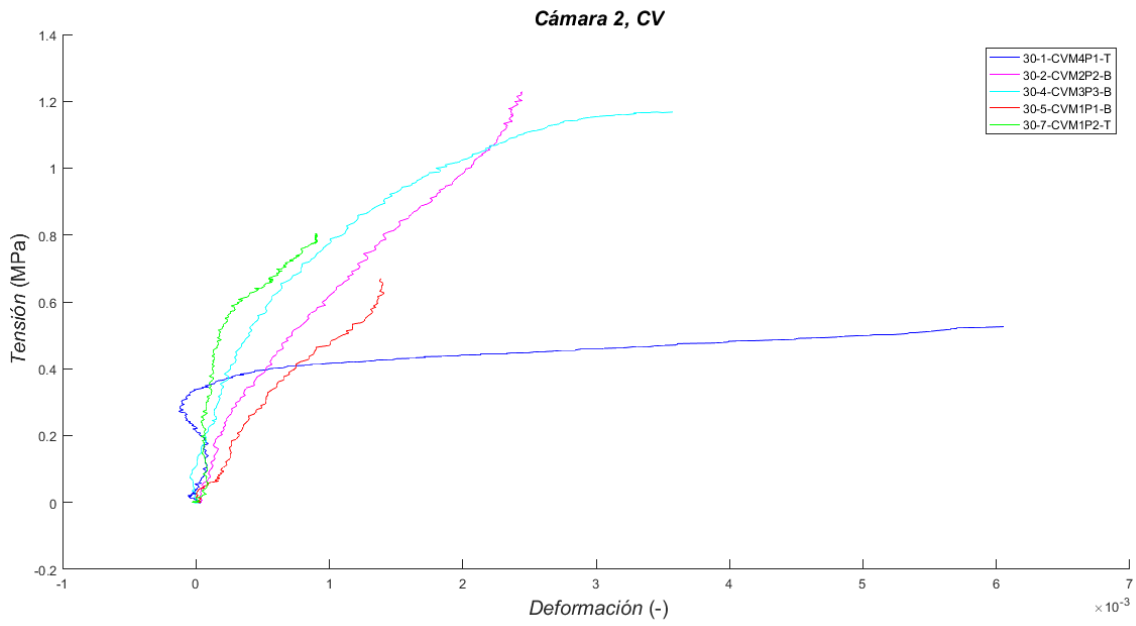


Tabla 0.3. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 30 días sin vidrio

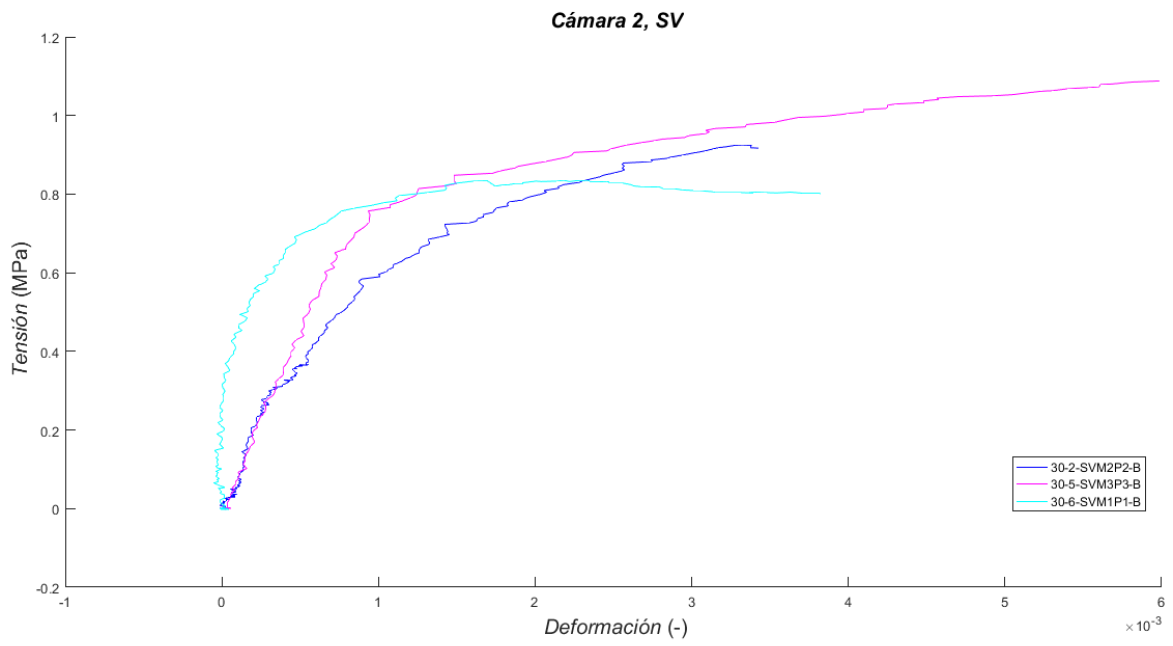
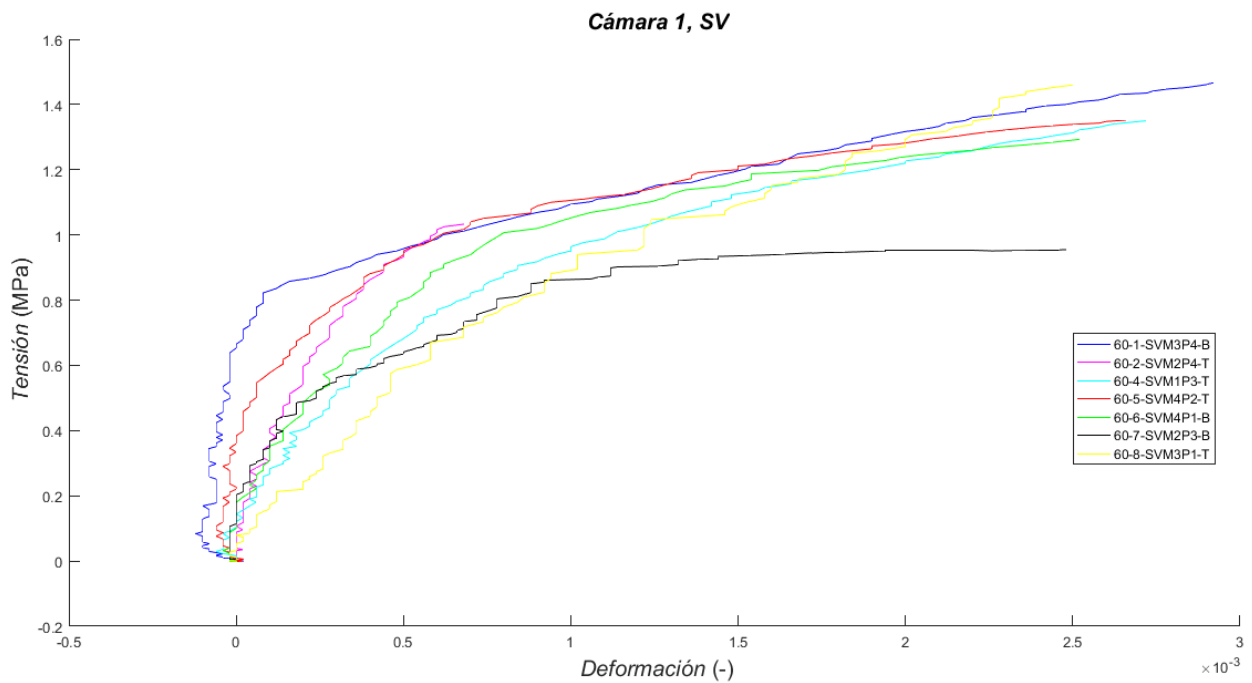
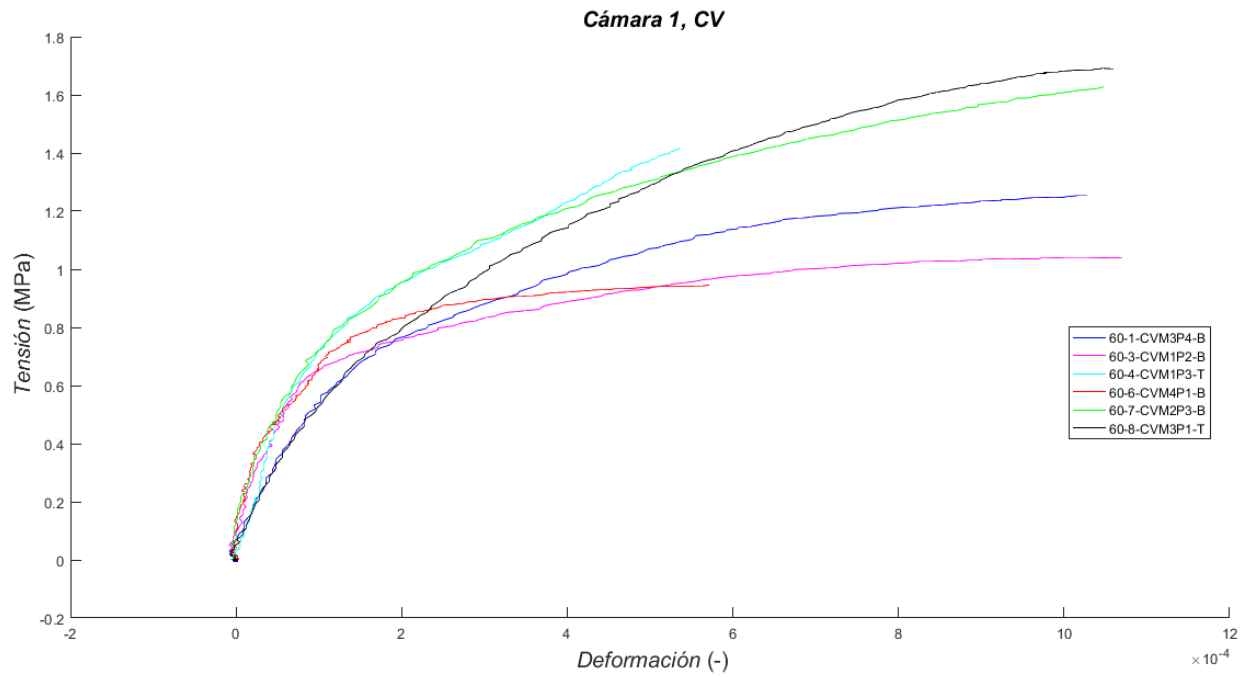


Tabla 0.4. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 30 días sin vidrio



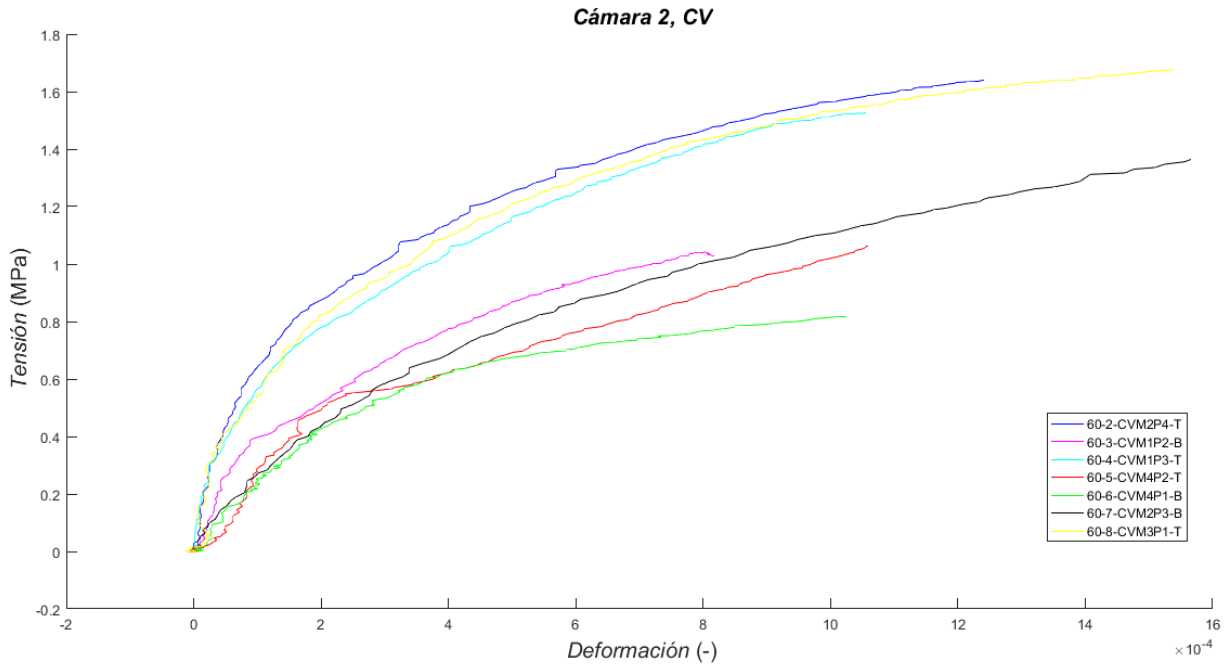


Tabla 0.7. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 60 días con vidrio

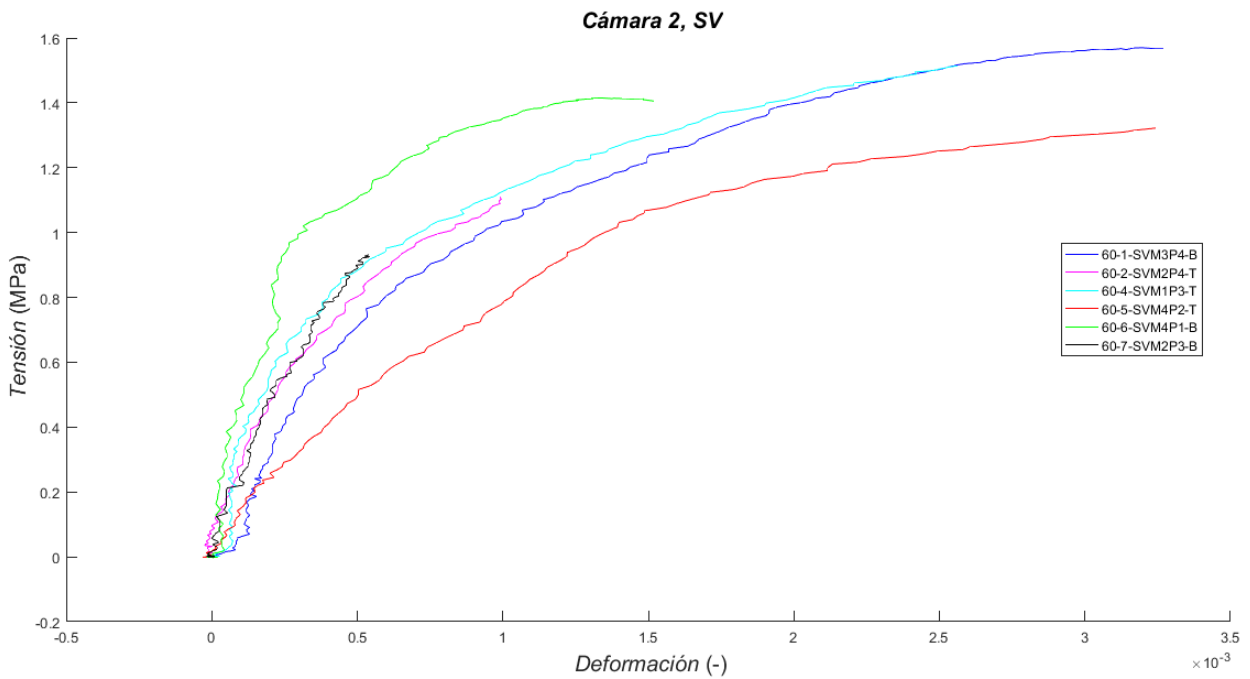


Tabla 0.8. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 60 días sin vidrio

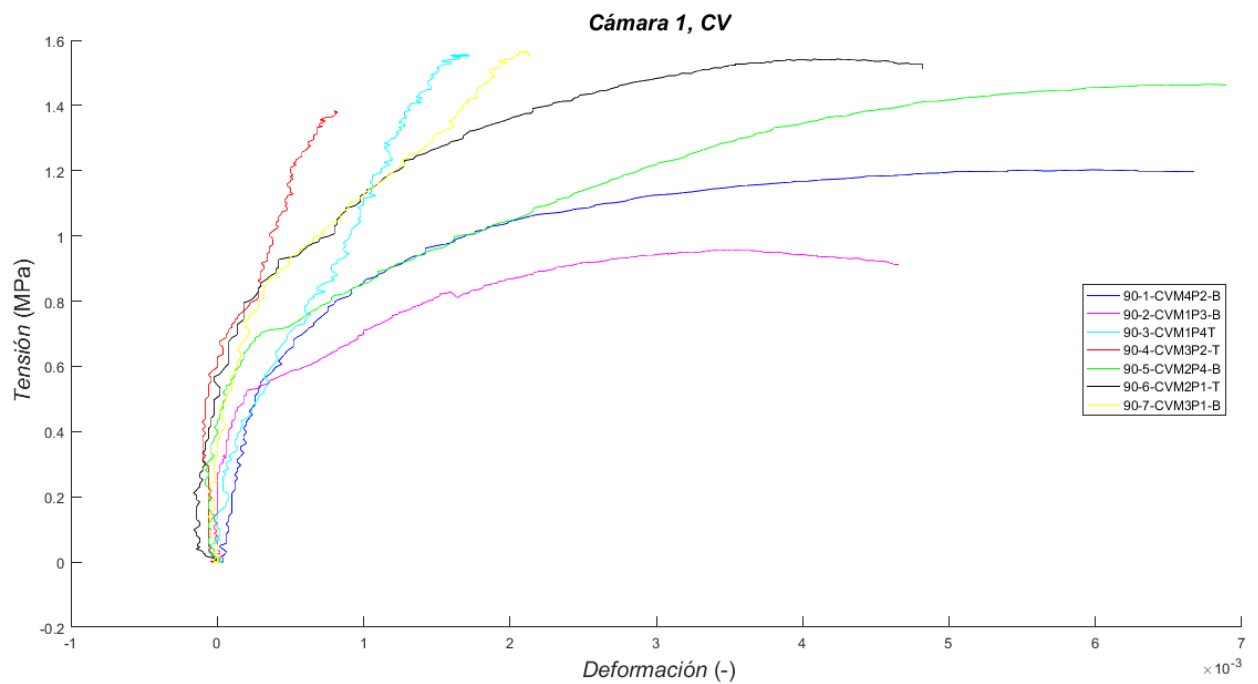


Tabla 0.9. Curvas tensión deformación cámara 1, probetas 90 días con vidrio

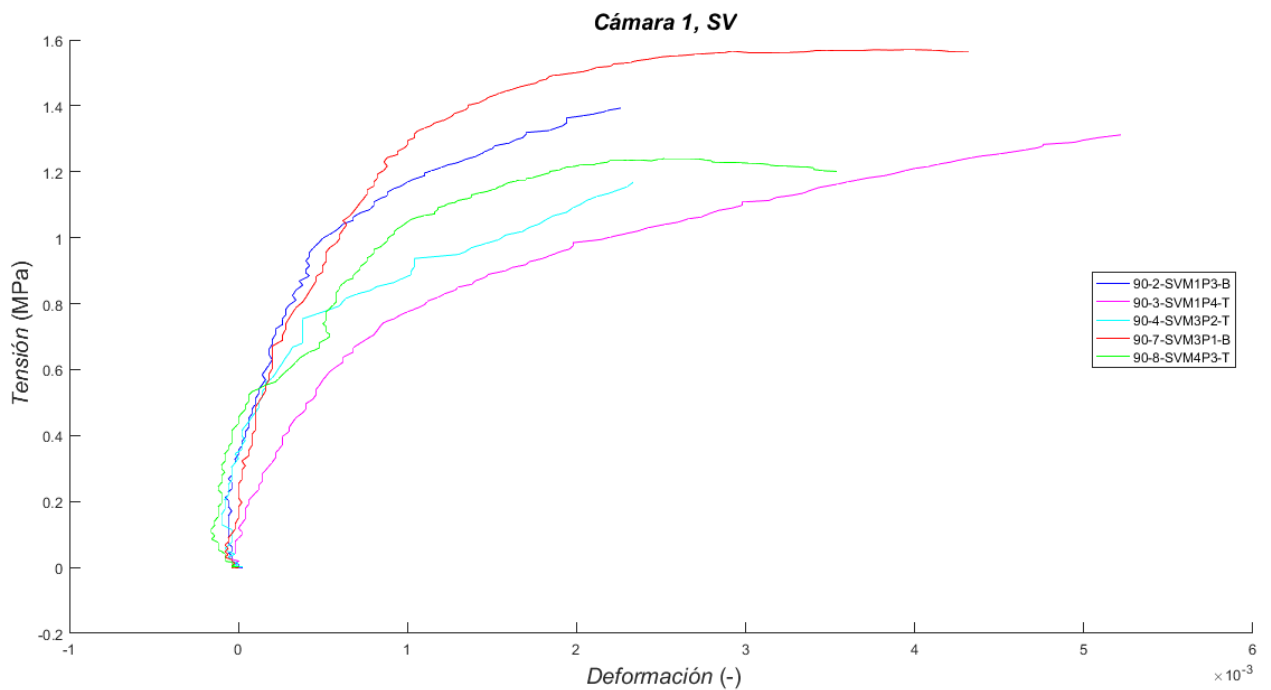


Tabla 0.10. Curvas tensión deformación cámara 1, probetas 90 días sin vidrio

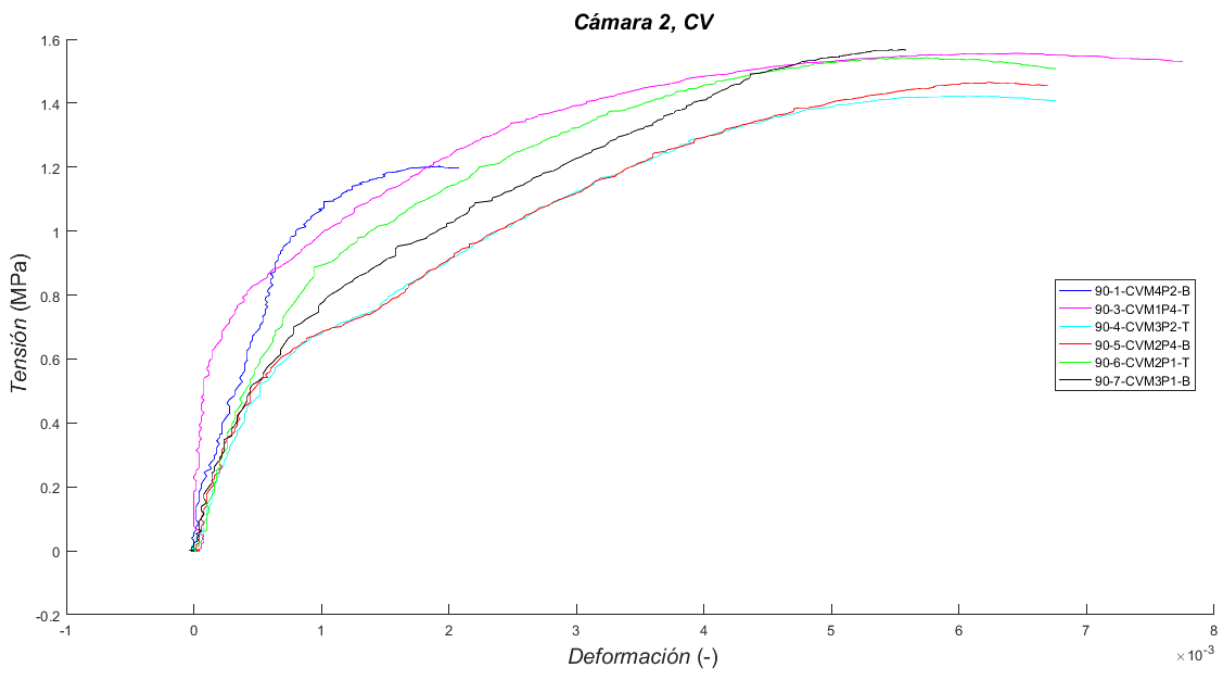


Tabla 0.11. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 90 días con vidrio

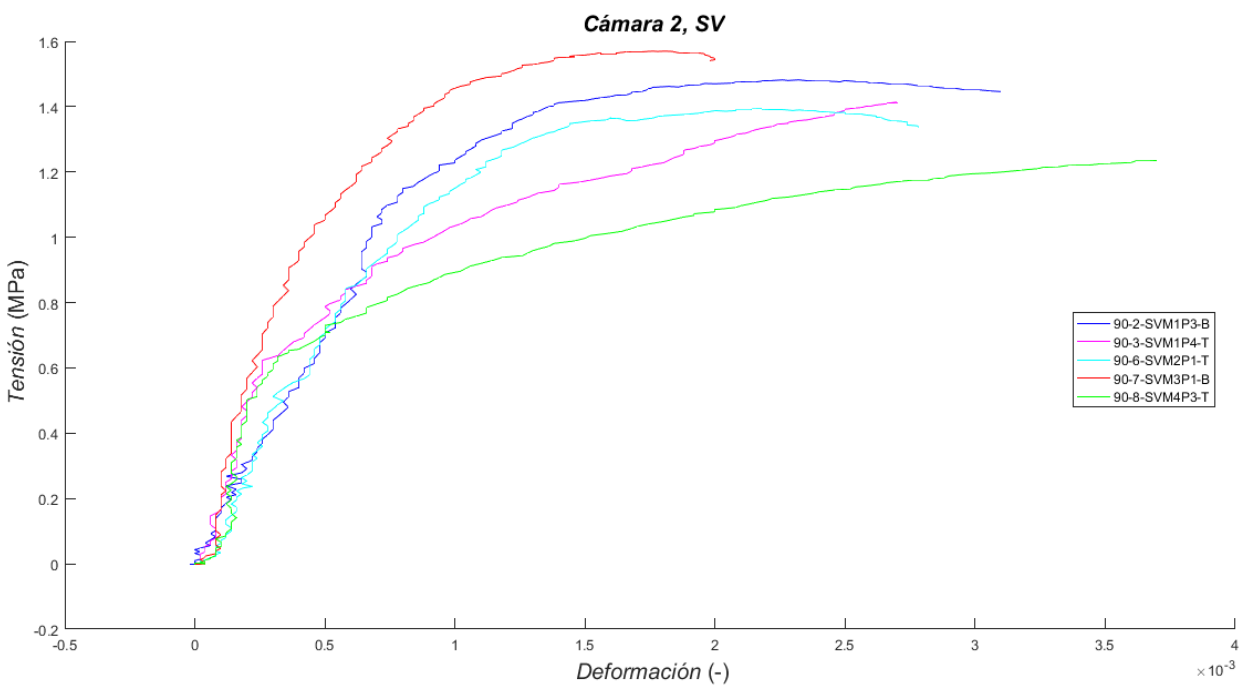


Tabla 0.12. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 90 días sin vidrio

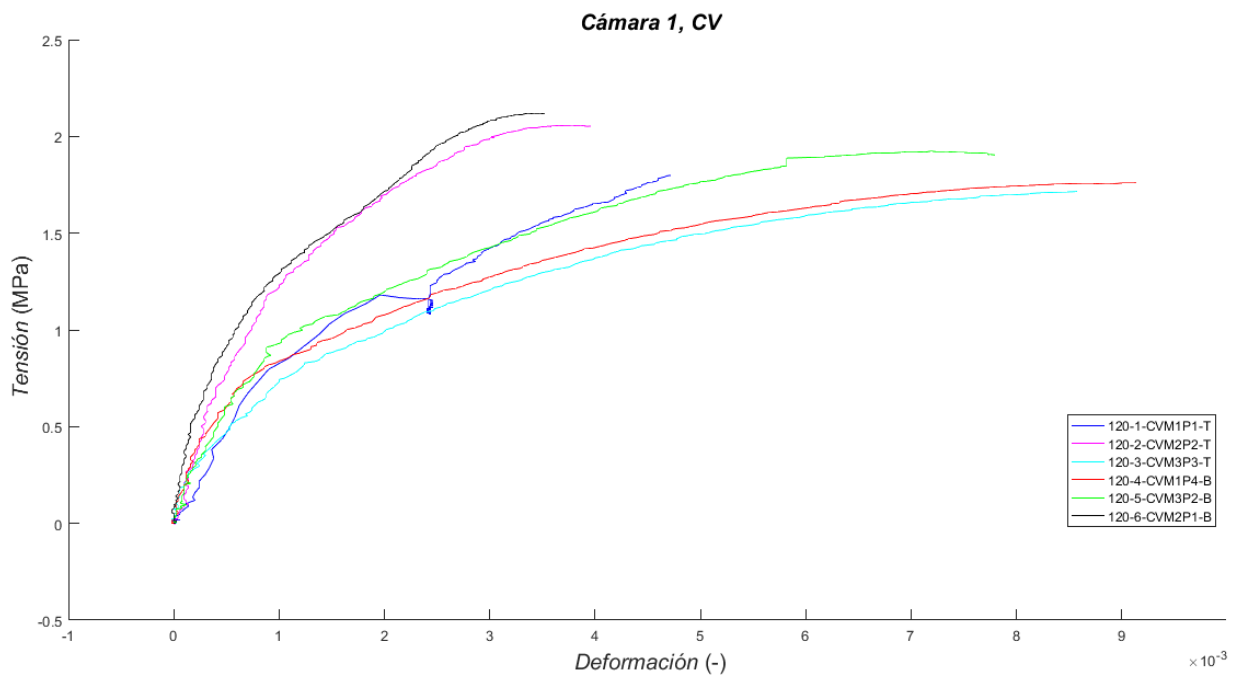


Tabla 0.13. Curvas tensión deformación cámara 1, probetas 120 días con vidrio

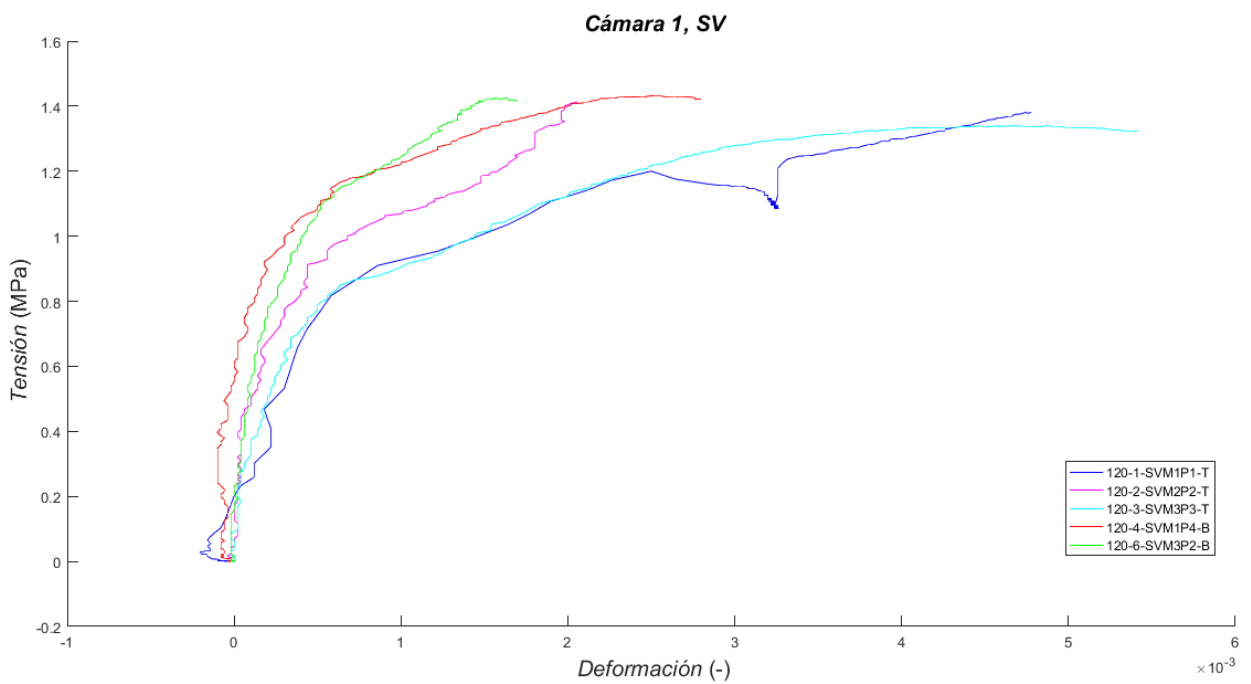


Tabla 0.14. Curvas tensión deformación cámara 1, probetas 120 días sin vidrio

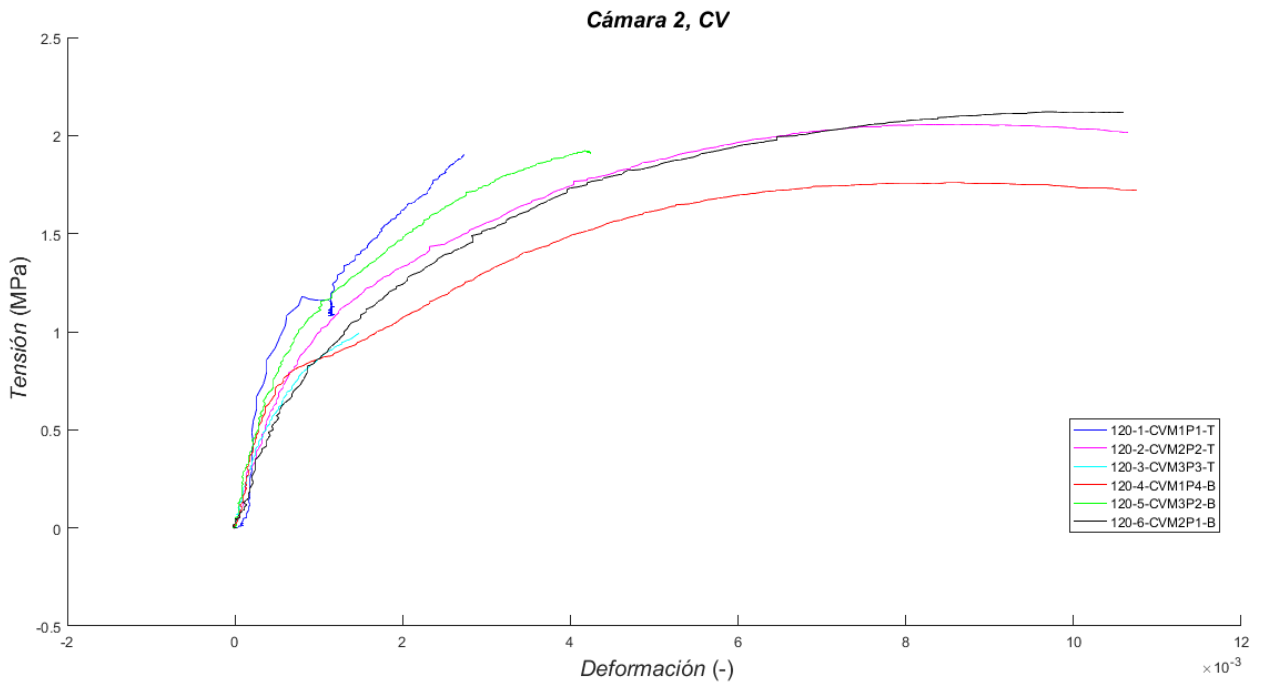


Tabla 0.15. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 120 días con vidrio

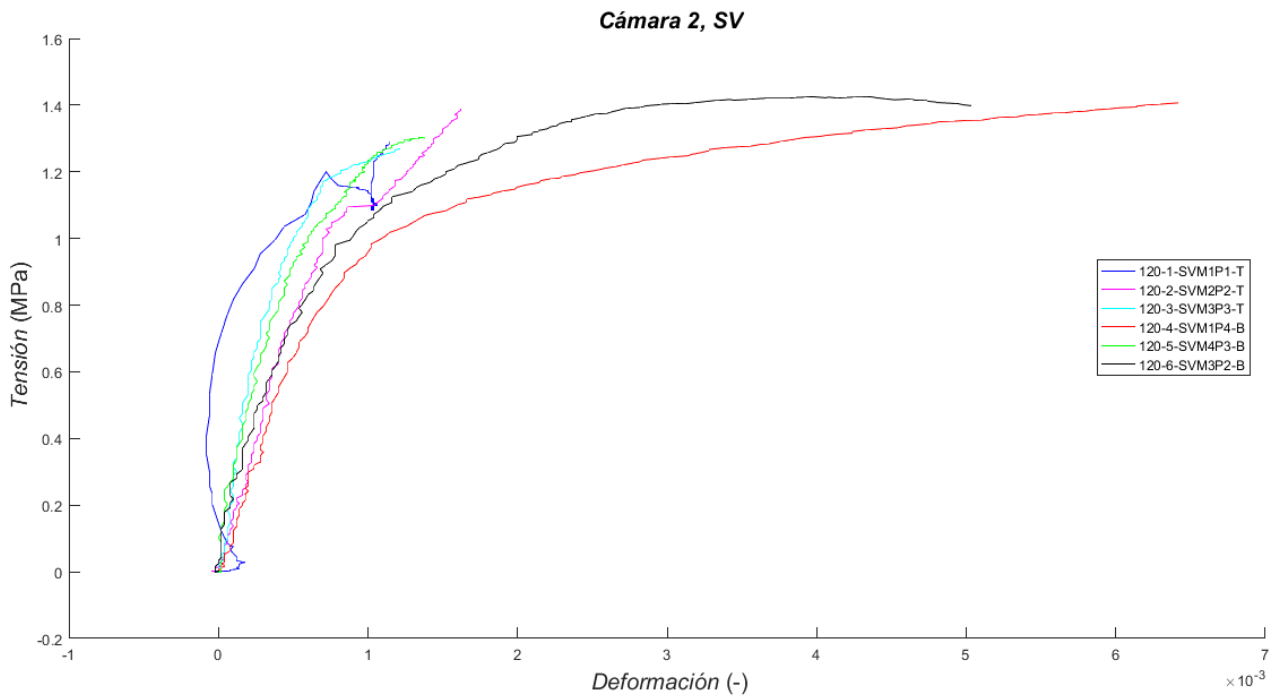


Tabla 0.16. Curvas tensión deformación cámara 2, probetas 120 días sin vidrio

ANEXO E

En este último anexo se presenta la gráfica con la evolución de las condiciones de humedad y temperatura referenciada en el apartado 5.4.1, a las cuales se han secado tanto las probetas con vidrio como las probetas sin vidrio hasta la fecha de realización de las respectivas tandas de ensayos.

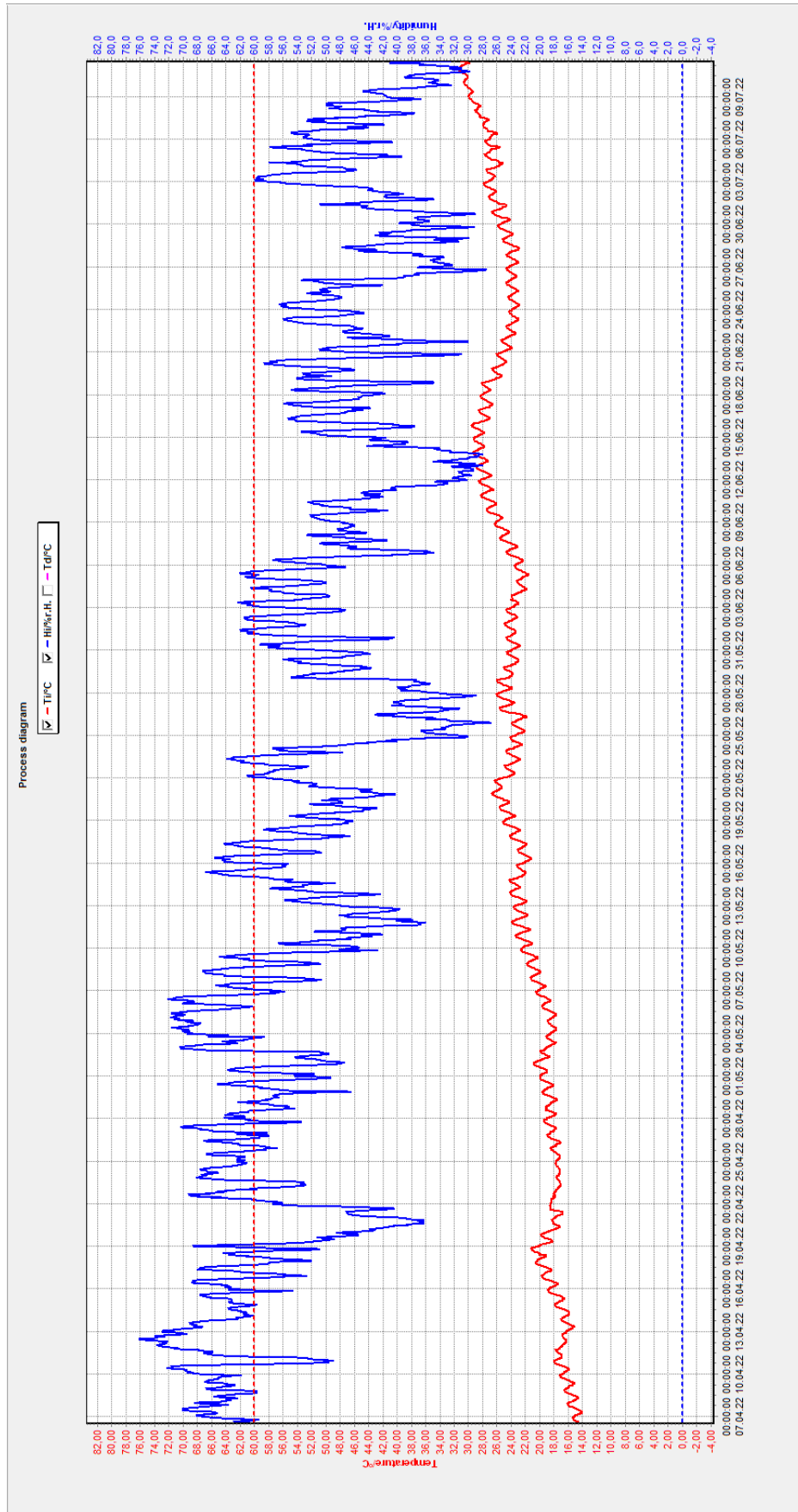


Figura 0.1. Humedad y temperatura durante el proceso de secado

REFERENCIAS

- [1] FONT, F. y HIDALGO, P., 2009. *Arquitecturas de tapia*. Castellón: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Castellón. ISBN 978-84-613-3142-0.
- [2] ROCHA, M. y JOVÉ SANDOVAL, F., 2015. *Técnicas de construcción con tierra: Introducción*. Lisboa: Argumentum. ISBN 9789728479893.
- [3] MINKE, G., 2010. *Manual de construcción en tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Teruel: EcoHabitar. ISBN 9788461424054.
- [4] MILETO, C. y VEGAS, F., 2014. *La restauración de la tapia en la Península Ibérica: criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. Valencia [etc: TC cuadernos]. ISBN 978-84-942233-3-4.
- [5] ARREDONDO Y VERDU, F., 1991. *Yesos y cales*. Madrid: Revista de Obras Públicas. Servicio de Publicaciones. ISBN 8474931398.
- [6] BAULUZ DEL RÍO, G. y BÁRCENA BARRIOS, P., 1992. *Bases para el diseño y construcción con tapial*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Centro de Publicaciones. ISBN 84-7433-839-5.
- [7] HOUBEN, H., 1995. *Traité de construction en terre*. [2me. ed.]. Marseille: Parenthèses. ISBN 2-86364-041-0.
- [8] GARCÍA, J., 2022. *Tapia con residuo de vidrio incorporado y estabilizadas con cal: inspección por ultrasonidos y caracterización de resistencia a compresión*
- [9] UNE 41410, *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. 2008.
- [10] UNE 7050-2, *Tamices y tamizado de ensayo*. 1997.
- [11] UNE 103-102, *Análisis de suelos finos por sedimentación*. 1995.
- [12] UNE 103-500, *Ensayo de Compactación. Próctor Normal*. 1994
- [13] UNE 103-300, *Determinación de la humedad de un suelo mediante el secado en estufa*. 1993
- [14] UNE-EN-14580, *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad estático*. 2005.
- [15] UNE-EN 12504-4, *Ensayos de hormigón en estructuras*. 2006.