



Tesis Doctoral

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL TAPIAL
Y SU APLICACIÓN A ESTRUCTURAS EXISTENTES
MEDIANTE EL USO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Autor:
IGNACIO ARTO TORRES

Director:
RAFAEL GALLEGO SEVILLA

Mayo de 2021

Programa de Doctorado en Ingeniería Civil
Escuela de Doctorado en Ciencias, Tecnologías e Ingenierías
Universidad de Granada



Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Ignacio Arto Torres
ISBN: 978-84-1306-962-3
URI: <http://hdl.handle.net/10481/69859>

Universidad de Granada
E.T.S. Ingeniería de Edificación
Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica
Programa de Doctorado en Ingeniería Civil
Escuela de Doctorado en Ciencias, Tecnologías e Ingenierías
Campus de Fuentenueva, s/n

*Dedicado a toda
mi familia, y especialmente a mis padres.*

Agradecimientos

La primera persona a la que tengo que agradecer el poder haber realizado este trabajo es a mi director de tesis, el catedrático D. Rafael Gallego Sevilla, quien me ha demostrado al cabo de todos estos años que su capacidad de trabajo y su paciencia conmigo son casi infinitas. Juntos, hemos aprendido hasta ahora muchas cosas sobre el tapial, y muchas más nos esperan aún. Rafael supo ver antes que nadie la necesidad de investigar sobre el tapial, y nunca podré agradecerle suficientemente que contara conmigo para esta labor. Tengo que agradecer también profundamente el interés y la ayuda mostrados por D. José Rodríguez Montero, quien puso todo su conocimiento y al equipo del laboratorio de Ingeniería de la Construcción, con María José Martínez-Echevarría, Nuria Husillos y Manuel Sánchez, a mi entera disposición, su amabilidad es inigualable. Agradezco también las lecciones recibidas de D. Eduardo Sebastián Pardo sobre funcionamiento de la cal, así como a los buenos consejos y ánimos que siempre recibí del D. Miguel Losada Rodríguez, en especial aquellos primeros en su casa de Rubayo, mi más sincero agradecimiento a todos ellos. Tengo que agradecer también todo el apoyo y ayuda que he recibido de Esther Puertas García, Lourdes Gutiérrez Carrillo y Jesús Garrido Manrique, las tres personas que más me han acompañado durante todos estos meses de trabajo, sin olvidar la ayuda y el material cedido por Isabel Bestué Cardiel, y al equipo del laboratorio de estructuras de la ETS de Ingeniería de la Universidad de Sevilla y en especial a Héctor Cifuentes Bulté, que siempre se mostró dispuesto a prestar toda la ayuda que fuese necesaria. Agradezco también el trabajo compartido con mi compañero en el SES-Lab LEE Fernando Ávila, con quien he tenido el gusto de fabricar decenas de probetas de tapial, sin olvidar por supuesto a Fernando Martínez Soto, que supo enseñarme un poco de todo su conocimiento en los ensayos FFRF. No puedo olvidarme tampoco de Olatz Rey y su forma de medir las probetas, espero que sepa perdonar mis retrasos. Quisiera agradecer de una forma especial también el trabajo y la ayuda recibida por Santiago Díaz, la mejor persona y más útil que puede haber en un laboratorio y que siempre fue capaz de solucionar cualquier problema de equipos o de logística de manera sencilla. Sin su ayuda y sin su carro azul todo habría sido más difícil. Y por último agradecer al director de la ETSIE D. Juan Manuel Santiago Zaragoza y a su equipo de gobierno la confianza que han depositado en este proyecto, ofreciendo un espacio físico en su Escuela donde toda esta investigación continúa. Debo agradecer también la dotación económica para sufragar gastos aportada desde el Consejo General de la Arquitectura Técnica de España, así como el material de cal cedido gratuitamente por la empresa HeidelbergCement.

Finalmente, y no por ello menos importante, debo agradecer a mi mujer Camino y a mis dos hijos Nacho y Javier el que hayan visto lo importante que era para mi realizar este trabajo. Espero que sepan perdonarme todas las horas que les he robado de estar juntos.

Resumen

El tapial es un material sumamente desconocido pese a estar presente en un gran número de edificios, tanto de carácter patrimonial como simplemente residencial. La causa de este desconocimiento radica en el olvido en el que cayó su uso debido principalmente a la llegada de otros materiales con unas capacidades mecánicas muy superiores y al progresivo encarecimiento de la mano de obra. Aún así, la aparición de una conciencia social en los últimos años más preocupada por la conservación del patrimonio y del medio ambiente ha hecho que los investigadores vuelvan su mirada sobre este material que, pese a estar presente en la historia de la humanidad desde hace miles de años es casi un desconocido a los ojos de la mecánica de estructuras.

En este trabajo de tesis se ha llevado a cabo una caracterización completa de un tapial patrimonial, ejecutado siguiendo los métodos tradicionales y con los mismos materiales empleados históricamente. Los trabajos realizados hasta la fecha muestran una gran diversidad de resultados sobre los parámetros analizados, debido a las diferencias incluidas en la fabricación de las probetas o a los métodos utilizados. Únicamente el valor de la densidad y del coeficiente de Poisson presentan valores comparables y cercanos entre los autores consultados. El primero de los factores, la densidad, ha quedado señalado como uno de los datos que más afecta al resto de parámetros mecánicos, siendo por tanto uno de los que mejor caracteriza el material.

Para la obtención de datos sobre estructuras existentes de valor patrimonial se deben utilizar ensayos no destructivos (END) de caracterización, que permitan conocer su capacidad mecánica sin alterar su materialidad. Los END utilizados en este trabajo de tesis han sido la Velocidad de Pulso Ultrasonico (UPV) y el ensayo de Frecuencia-Resonancia (FFRF). A partir del primero se ha llegado a formular una expresión que relaciona los datos obtenidos a partir de él con la carga máxima de compresión, mientras que el segundo de los END utilizados se ha mostrado útil para probetas de tapial, si bien se requiere un ajuste en cuanto a la cuantificación de la masa de las probetas. El método FFRF se ha mostrado eficaz para detectar fallos internos en las probetas, no solo a partir de los valores resultantes sino principalmente por la forma que presentan los autoespectros calculados. Se ha observado también el efecto del tamaño de las probetas, su relación longitud-sección, en los datos aportados por el ensayo FFRF, localizando los modos de vibración más sensibles.

En la caracterización de fractura se han encontrado datos interesantes relacionados con las dosificaciones empleadas, en las que las probetas con un mayor contenido en cal muestran valores de energía de fractura mayores. Al mismo tiempo esas probetas muestran también valores superiores de longitud característica y por tanto una zona de proceso de fractura de un mayor

tamaño en relación a las probetas de menor cantidad de cal. Los datos numéricos obtenidos de longitud característica engloban el comportamiento del tapial dentro del mismo comportamiento del hormigón en masa, coincidiendo además este comportamiento a nivel cualitativo al observar las curvas de ablandamiento. Por lo tanto se ha podido considerar al tapial como un material cuasi-frágil, que responde al modelo de grieta discreta de Hillerborg.

Continuando con los ensayos sobre las probetas se han obtenido valores de carga máxima a compresión, módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson, mediante los métodos destructivos habituales, poniendo en relación los datos obtenidos con los aportados por las técnicas END. Se ha constatado el ablandamiento que se produce sobre las probetas y el comportamiento no-lineal que se observa durante la aplicación de la carga, lo que complica la obtención del módulo de elasticidad. Finalmente, se ha llevado a cabo de forma paralela un estudio que evidencia el largo periodo de tiempo que los materiales estabilizados con cal deben atravesar hasta completar su completa carbonatación. Además se ha puesto de manifiesto un proceso de autobloqueo de la carbonatación, más acusado en función de la cantidad de cal presente en la mezcla, y que ha sido claramente identificado al medir los frentes de carbonatación en las probetas de distintas dosificaciones.

Contenido

- Agradecimientos** **III**
- Resumen V

- Lista de figuras** **XI**

- Lista de tablas** **XIX**

- 1. Introducción** **3**
- 1.1. Motivación para la investigación 4

- 2. Antecedentes y objetivos** **9**
- 2.1. Revisión normativa 9
- 2.2. Investigaciones más significativas 11
- 2.3. Resumen de datos obtenidos de las investigaciones más significativas. 25
- 2.4. Justificación para la investigación 25
- 2.5. Objetivos 27

- 3. Acercamiento al tapial** **31**
- 3.1. Alcance del tapial desde una óptica histórica y humana 31
- 3.1.1. Alcance histórico 31

3.1.2. Alcance geográfico y demográfico	34
3.2. Breve explicación de la ejecución de un tapial	37
3.3. Tipologías de los tapias	41
4. Metodología y materiales	49
4.1. Metodología empleada en la investigación	49
4.2. Elección y clasificación de los materiales a emplear.	52
4.2.1. La tierra	53
4.2.2. La cal	58
4.3. Dosificación de la mezcla del tapial	59
4.4. Fabricación de los encofrados del tapial	61
4.5. Ejecución de las probetas	62
4.5.1. Amasado	62
4.5.2. Compactación	63
5. Ensayos destructivos. Compresión sobre probetas y sub-probetas cúbicas	67
5.1. Metodología de realización de ensayos a compresión sobre probetas cúbicas	68
5.2. Obtención del módulo elástico secante a partir de ciclos de carga	70
5.3. Resultados de ensayos a compresión sobre probetas cúbicas	73
6. Ensayos de fractura en probetas de tapial	79
6.1. Base teórica de la mecánica de fractura	80
6.2. Metodología de ensayos a fractura sobre probetas	82
6.3. Análisis de resultados obtenidos de ensayos 3PBT sobre probetas de tapial	86
6.4. Leyes de ablandamiento de las probetas de tapial	91

6.5. Obtención del módulo de elasticidad a partir de curvas P-CMOD	93
6.6. Longitud característica del tapial de las probetas	95
6.7. Análisis de los resultados obtenidos en los ensayos 3PBT	97
7. Ensayos de velocidad de pulso ultrasónico (UPV) en probetas	101
7.1. Evolución temporal de UPV en las probetas prismáticas	104
7.2. Datos finales de UPV en probetas cúbicas y prismáticas	107
7.3. Valores de módulo de elasticidad en tapial a partir de UPV	110
8. Ensayos de frecuencia-resonancia (FFRF) sobre probetas de tapial	113
8.1. Base teórica del ensayo	113
8.2. Material empleado en los ensayos FFRF	117
8.3. Obtención de datos mediante FFRF sobre probetas prismáticas	119
8.4. Obtención de datos mediante FFRF sobre probetas cúbicas	133
8.5. Obtención de datos mediante FFRF sobre sub-probetas prismáticas sP (205.100.100 mm)	141
8.6. Obtención de datos mediante FFRF sobre sub-probetas cúbicas ssP (100.100.100 mm)	155
9. Efecto de la carbonatación sobre las probetas de tapial	163
9.1. Desarrollo de la carbonatación en las probetas cúbicas	164
9.2. Desarrollo de la carbonatación en las sub-probetas cúbicas ssP	171
10. Control de la pérdida de peso en las probetas	173
10.1. Análisis de los resultados obtenidos	175
11. Contraste de resultados y correlación de los obtenidos con diferentes técnicas	179

11.1. Contraste de resultados. Ensayos no destructivos	179
11.2. Contraste de resultados. Ensayos no destructivos	185
11.3. Correlación de resultados. Módulo de elasticidad	188
11.4. Correlación de resultados. Resistencia a compresión	189
11.5. Correlación de resultados. Densidad	190
12. Conclusiones	193
13. Desarrollos futuros	199
A. Curvas de tensión-deformación sobre probetas y sub-probetas cúbicas	201
B. Curvas $P-\delta$ en ensayos 3PBT sobre probetas de tapial	217
C. Evolución temporal de UPV en probetas prismáticas	225
D. Resultados de ensayos FFRF sobre probetas prismáticas	231
E. Resultados de ensayos FFRF sobre probetas cúbicas	265
F. Tablas de cálculo de módulos de elasticidad y rigidez transversal a partir de frecuencias de resonancia	281
G. Resultados de ensayos FFRF sobre sub-probetas prismáticas 205.100.100	293
H. Cambios de humedad en probetas	309
I. Datos de cantidad de agua, densidad y UPV de todas las probetas cúbicas	325
Bibliografía	327

Índice de figuras

1.1.	Documentación histórica sobre el estado de la torre Turpiana y la torre de Comares	4
1.2.	Fotografía de las torres Quebrada, del Homenaje y de las Gallinas. Jean Laurent 1871-1874. Archivo del Patronato de la Alhambra y Generalife	6
1.3.	Estado de conservación de torres defensivas en el entorno de Granada	7
2.1.	Estado actual de fisuración de la Torre de las Gallinas de la Alhambra. s.XIV	28
3.1.	Ciudadela de Arg-é Bam antes del terremoto de 2003. Fuente: wikipedia.org	33
3.2.	Alcance geográfico del tapial. Fuente: craterre.com (Sensi, 2003)	34
3.3.	Edificio de viviendas en Weilburg an der Lahn (Alemania). Fuente: doatrip.de	35
3.4.	Ejemplos de edificación contemporánea con tapial	36
3.5.	Materiales y ejecución del tapial según Juan de Villanueva (Villanueva, 1827)	38
3.6.	Mechinales en alzado de muro de tapial. Muralla Zirí de Granada. s.XII	39
3.7.	Representación de la ejecución de un tapial. Fuente: British Museum	40
3.8.	Ejecución del tapial según Fernández Balbuena (Balbuena, 1922)	41
3.9.	Tapial hormigonado. Muralla de la Alhambra. s.XIV	42
3.10.	Tapial de cal y cantos. Puerta de San Cecilio. (Granada) s.XIII	43
3.11.	Tapial calicostrado. Torre de las Gallinas (Alhambra) s.XIV	44
3.12.	Tapial con verdugadas de ladrillo. Hospital de San Juan de Dios. (Granada) s.XVI	46

3.13. Tapia mixta.	47
3.14. Tapia con juntas reforzadas. Muralla de Cáceres s.XII.	48
4.1. Diagrama del trabajo realizado en la tesis	50
4.2. Tipos de probetas utilizadas y ensayos realizados sobre cada tipología	52
4.3. Ensayos de obtención de granulometría por sedimentación	53
4.4. Curvas de granulometría del material seleccionado, según la cantera, el laboratorio LEE y la granulometría laser	54
4.5. Comparación de la curva granulométrica del material seleccionado con los máximos y mínimos de los autores citados	56
4.6. Comparación de las curvas granulométricas del material seleccionado con las murallas de la ciudad de Granada y de San Juan de Aznalfarache (Sevilla)	57
4.7. Curvas granulométricas de las tapias del Generalife y del subsuelo de la colina de la Sabika	58
4.8. Esquema resumen del ciclo de la cal	59
4.9. Elementos materiales que conforman un tapial tradicional (Gasparini y Margolies, 1986)	61
4.10. Moldes desmontables de madera para fabricación de las probetas de tapial	62
4.11. Probeta prismática desmoldada y almacenamiento de probetas cúbicas y prismáticas en laboratorio LEE	64
5.1. Prensa y equipos de captación de datos durante los ensayos de compresión sobre las probetas y sub-probetas cúbicas	68
5.2. Ciclos para determinación del módulo secante de elasticidad estabilizado - método B (UNE-EN:12390-13, 2014)	69
5.3. Valores de desplazamiento medidos mediante LVDT sobre sub-probeta ssP 9.2.1. Analizado con el software CatmanEasy	70
5.4. Tensiones de ciclos de carga de sub-probetas cúbicas	71
5.5. Gráficas de tensión-deformación durante los ciclos de carga en sub-probetas cúbicas ssP-12.1.2 y ssP-12.2.1	73

5.6. Representación gráfica del comportamiento del hormigón bajo compresión uniaxial (Glucklich, 1968)	74
5.7. Gráficas de tensión-deformación de ensayos de compresión uniaxial sobre probeta cúbica 4.1 y sub-probeta cúbica ssP-11.2.1	74
5.8. Criterio de aceptación de rotura con forma satisfactoria según UNE-EN:12390-3 (2019)	75
5.9. Roturas consideradas como satisfactorias en probetas de tapial	75
5.10. Valores de carga máxima de compresión en series de probetas cúbicas (cúbicas) y sub-probetas cúbicas (ssP)	77
6.1. Curva de ablandamiento de un material cuasifrágil sometido a tracción. (Hillerborg, 1985)	80
6.2. Esquema de detalle de la ZPF. (Shi, 2009)	81
6.3. Esquema de ensayo WST. (Brühwiler y Wittmann, 1990)	82
6.4. Esquema de ensayo 3PBT. (Hillerborg <i>et al.</i> , 1976)	83
6.5. Datos geométricos de probetas para ensayos 3PBT según RILEM.	83
6.6. Dimensiones de entalla en probeta P-2 y su posterior rotura durante el ensayo	85
6.7. Curva P- δ de probeta P-1	86
6.8. Imágenes de ensayo 3PBT sobre probeta P-1	87
6.9. Curva P- δ de probeta P-2	88
6.10. Curva P- δ de probeta P-5	89
6.11. Ley de ablandamiento bi-lineal. (Cifuentes <i>et al.</i> , 2018)	91
6.12. Aproximación de curva tensión-fisuración a un modelo bilineal (Østergaard, 2003) y comparación entre curva P- δ experimental y ley bilineal ajustada para la probeta P-6	92
6.13. Representación del valor E_i sobre la curva P-CMOD de la probeta P-7	93
6.14. Comparación de resultados de módulo de elasticidad en función del método utilizado	95

6.15. Tamaño de la ZPF según el comportamiento frágil o dúctil del material (Karihaloo, 1995)	96
6.16. Efecto de las fuerzas cohesivas en el vertice de la fractura según Hillerborg <i>et al.</i> (1976), tomado de Cifuentes y Medina (2013)	98
6.17. Curva σ -w según dosificaciones de las probetas de tapial	98
6.18. Valores de apertura en $\sigma(w)=100, 150, 200$ y 250 N, según dosificaciones de las probetas prismáticas de tapial	99
7.1. Esquema de colocación de transductores en la realización de los ensayos UPV en probetas prismáticas	103
7.2. Probeta cúbica durante la realización de los ensayos UPV	104
7.3. Variación de UPV en probetas prismáticas por dosificación.	105
7.4. Variación temporal de UPV en probetas prismáticas. En línea de puntos probetas con dosificación 3:1, línea de trazos probetas con dosificación 4:1	106
7.5. Incremento acumulado de UPV en probetas prismáticas	106
7.6. Datos de resultados finales de UPV en probetas cúbicas y prismáticas según su dosificación	107
7.7. Relación velocidad-densidad en probetas de tapial	110
7.8. Relación de agua en probeta y módulo de elasticidad dinámico	112
8.1. Modos de excitación de probetas. ASTM-C:215-19 (2019)	114
8.2. Valores del factor corrector T, según ASTM-C:215-19 (2019)	116
8.3. Ensayo FFRF longitudinal sobre sub-probeta 11.2	118
8.4. Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo transversal de probeta 1	121
8.5. Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo longitudinal de probeta 1	122
8.6. Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo torsional de probeta 1	123

8.7. Frecuencias de resonancia en los tres modos de vibración de probeta 5	126
8.8. Vista en detalle de la cara exterior de la sub-probeta cúbica ssP 9.1.1	127
8.9. Frecuencias de resonancia en los tres modos de vibración de probeta P-10	128
8.10. Relaciones entre módulos de elasticidad dinámicos y módulo de rigidez transversal dinámico en probetas de tapial	129
8.11. Relación entre módulos de elasticidad dinámicos y de rigidez transversal dinámico en función de la dosificación. Probetas prismáticas	130
8.12. Relación entre módulos de elasticidad dinámicos y de rigidez transversal dinámico en función de la dosificación. Probetas prismáticas	131
8.13. Relación entre módulos dinámicos de elasticidad obtenidos mediante FFRF y UPV. Probetas prismáticas	132
8.14. Factor de relación entre módulos dinámicos de elasticidad obtenidos mediante FFRF y UPV. Probetas prismáticas	133
8.15. Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo transversal de probeta 3.3	134
8.16. Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo longitudinal de probeta 3.3	135
8.17. Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo torsional de probeta 3.3	136
8.18. Espectro de Fourier de probeta 4.2 en modo torsional	137
8.19. Relación entre módulos dinámicos de elasticidad obtenidos mediante FFRF y UPV. Probetas cúbicas	139
8.20. Valores de módulos de elasticidad y de rigidez transversal dinámicos en probetas cúbicas (c) y prismáticas (p) de tapial	140
8.21. Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo transversal de sub-probeta sP-6.1	143
8.22. Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo longitudinal de sub-probeta sP-6.1	144
8.23. Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo torsional de sub-probeta sP-6.1	145

8.24. Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo transversal de sub-probeta sP-12.1	146
8.25. Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo longitudinal de sub-probeta sP-12.1	147
8.26. Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo torsional de sub-probeta sP-12.1	148
8.27. Valores de frecuencia de resonancia de sub-probeta sP-7.1	150
8.28. Valores de frecuencia de resonancia de sub-probeta sP-7.2	151
8.29. Relaciones entre módulos de elasticidad dinámicos y módulo de rigidez transversal dinámico en sub-probetas sP de tapial	153
8.30. Vista de la preparación de la sub-probeta 11.2 en modo longitudinal	155
8.31. Sub-probeta cúbica ssP-9.1.2 tras su rotura no controlada	156
8.32. Detalle de los espectros de frecuencias de la sub-probeta sP-9.1	157
8.33. Espectros de frecuencia más representativos de sub-probetas cúbicas ssP	158
8.34. Comparación de valores de módulo de elasticidad dinámico, a partir del modo longitudinal de vibración, entre series cúbicas (c), prismáticas (p) y sub-probetas cúbicas (ssP)	161
9.1. Carbonatación en probetas cúbicas de tapial	165
9.2. Curvas de carbonatación para las series de probetas cúbicas de dosificación 3:1 y 4:1	169
9.3. Carbonatación de la probeta prismática de sacrificio. Dosificación 3:1	171
10.1. Curvas de pérdidas de humedad en series de probetas cúbicas. Dosificación 3:1	176
10.2. Curvas de pérdidas de humedad en series de probetas cúbicas. Dosificación 4:1	177
10.3. Curva de pérdidas de humedad media acumulada en probetas prismáticas	178
11.1. Correlaciones entre módulos dinámicos y UPV. Probetas prismáticas	180
11.2. Correlaciones entre módulos dinámicos en ensayos FFRF. Probetas prismáticas	181

11.3. Correlaciones entre módulos dinámicos y UPV. Probetas cúbicas	183
11.4. Correlaciones entre módulos dinámicos en ensayos FFRF. Probetas cúbicas . . .	184
11.5. Correlaciones entre resultados ensayos destructivos	186
11.6. Correlaciones de la energía de fractura con UPV y densidad	187
11.7. Valores de módulo de elasticidad en probetas de tapial	188
11.8. Relaciones obtenidas entre UPV y f_c	190
11.9. Valores de UPV-densidad en las probetas de tapial y curva de relación según la expresión (11.5)	191
12.1. Sección y planta de la torre de Comares. Fuente: Archivo del Patronato de la Alhambra y Generalife	197
E.1.	273
G.1.	302

Índice de tablas

2.1. Capacidad mecánica del tapial según los autores consultados	25
4.1. Resumen de datos de pruebas de granulometría por sedimentación	54
4.2. Dosificaciones históricas del tapial en la Alhambra según De la Torre (1994) . .	60
4.3. Resumen de datos iniciales de probetas prismáticas de tapial	64
4.4. Resumen de datos iniciales de probetas cúbicas de tapial	65
5.1. Datos de ciclos de carga sobre sub-probetas cúbicas ssP y valor de $E_{c,s}$	72
5.2. Resumen de datos de probetas y sub-probetas cúbicas	76
6.1. Profundidad de entalla y área de ligadura en probetas de tapial	85
6.2. Valores de trabajo y energía de fractura en probetas de tapial	90
6.3. Valores de ablandamiento según curva bi-lineal para probetas de tapial	92
6.4. Valores de módulo de elasticidad en función del método utilizado	94
6.5. Valores de longitud característica (l_{ch}), longitud de la zona de proceso de frac- tura (l_{ZPF}) y número de fragilidad (β_H) para las probetas de tapial	97
7.1. Relación entre agua, densidad final y valores de UPV en probetas cúbicas	108
7.2. Relación entre agua, densidad final y valores de UPV en probetas prismáticas .	108
7.3. Estimación del módulo de elasticidad dinámico en series de probetas cúbicas a partir de la UPV y la densidad, para $\nu=0,30$	111

7.4. Estimación del módulo de elasticidad dinámico en probetas prismáticas a partir de la UPV y la densidad, para $\nu=0,30$	111
8.1. Resumen de datos obtenidos mediante FFRF sobre probetas prismáticas	124
8.2. Valores de módulos estáticos a partir de dinámicos en probetas prismáticas	131
8.3. Resumen de datos obtenidos mediante FFRF sobre probetas cúbicas	138
8.4. Valores de módulos estáticos a partir de dinámicos en probetas cúbicas	140
8.5. Resumen de datos obtenidos mediante FFRF sobre sub-probetas prismáticas sP	152
8.6. Comparación de valores de módulos de elasticidad y de rigidez transversal, dinámicos y estáticos, entre probetas prismáticas y sub-probetas prismáticas sP	154
8.7. Resumen de datos obtenidos mediante FFRF sobre sub-probetas cúbicas ssP	159
8.8. Comparación de valores de módulos de elasticidad y de rigidez transversal dinámicos y estáticos entre probetas prismáticas, sub-probetas prismáticas sP y sub-probetas cúbicas ssP	160
9.1. Datos de carbonatación sobre probetas cúbicas de dosificación 3:1	167
9.2. Datos de carbonatación sobre probetas cúbicas de dosificación 4:1	168
10.1. Valores medios de cambio de densidad y contenido en agua durante los primeros 22 días en probetas cúbicas	174
10.2. Valores medios de cambio de densidad y contenido en agua durante los primeros 22 días en probetas prismáticas	174
10.3. Comparación de resultados de densidad con agua de amasado y dosificación	175
11.1. Datos resumen de valores más significativos en función de la dosificación y tipo de probeta	185

Capítulo 1

Introducción

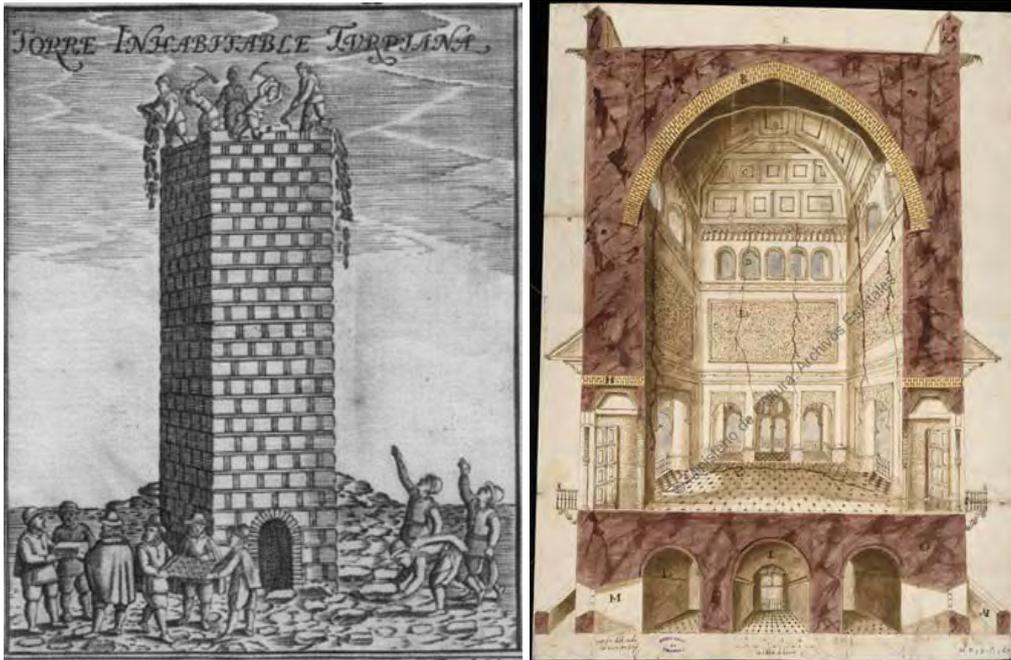
Como se expone a lo largo de esta memoria de tesis, el estudio de las capacidades mecánicas del tapial es un campo de investigación sobre el cual se han realizado aún pocos trabajos, y menos aún cuando el estudio se centra en los tapias existentes en estructuras reales de carácter patrimonial. Los datos recogidos por investigaciones anteriores son muy dispares, fruto de las diferentes metodologías, dosificaciones y técnicas empleadas en ellos.

Aún es menor el número de investigaciones realizadas para obtener una caracterización del régimen no lineal del tapial, pudiendo decir que no existe ningún trabajo previo sobre la dicha caracterización aplicada a tapias patrimoniales. La obtención y relación entre parámetros como el módulo de elasticidad E_c , la energía de fractura G_F , la carga máxima a compresión f_c o la tensión máxima a tracción f_t de tapias históricas es en sí una novedad en investigación, existiendo muy pocos trabajos anteriores que obtengan todos estos datos sobre el mismo material. Además, la caracterización en fractura del material o la aplicación de técnicas no destructivas basadas en la frecuencia de resonancia son dos nuevos campos del conocimiento que se aplican juntos por primera vez a tapias históricas.

El uso de ensayos no destructivos (END) permite obtener datos mecánicos sobre estructuras reales patrimoniales, sin que éstas vean afectadas en su materialidad, por lo que será posible conocer la capacidad mecánica del material con el que están construidas sin provocar alteraciones sobre ellas, siendo esta una de las premisas principales al actuar sobre el patrimonio. Este conocimiento permitirá por tanto recrear modelos sintéticos más fiables que los actuales, basados en muchos casos en valores mecánicos asumidos desde otros materiales. Así, el aumento en la fiabilidad y en el grado de detalle de los datos obtenidos hará que sea posible realizar intervenciones de mejora de la vulnerabilidad estructural más certeras y de menor coste sobre las estructuras patrimoniales en las que sea necesario intervenir.

1.1. Motivación para la investigación

Si se revisa la sismicidad histórica de la Península Ibérica se comprueba que no es muy elevada en comparación con otros países del ámbito mediterráneo. Eso no quiere decir que la Península esté libre de sus efectos, y muy al contrario, se produce una mayor exposición por causa de una relajación social y de concienciación ante sus consecuencias. Hay que tener siempre presente la máxima de “*donde la tierra ha temblado volverá a hacerlo*”.



(a) Demolición de la Torre Turpiana. Archivo de la Abadía del Sacromonte
 (b) Alzado de la torre de Comares por Juan de Rueda (1.686). Archivo General de Simancas M.P. y D. XIII-60

Figura 1.1: Documentación histórica sobre el estado de la torre Turpiana y la torre de Comares

En un breve análisis histórico se puede ver como la ciudad de Granada a sufrido numerosos terremotos, registrados desde hace muchos siglos. Destaca el periodo de los siglos XV y XVI en los que se produjeron al menos catorce terremotos destructores en la Península, de los que nueve llegaron hasta una intensidad de IX. Entre ellos, el en ámbito de la ciudad de Granada, destacan los terremotos 1431 y 1526.

Sobre el terremoto de 1431 se puede leer la crónica de Alonso Barrantes (Galbis, 1932) que dice literalmente “(...) en este tiempo temió mucho la tierra en el real e más en la ciudad de Granada, e mucho más en la Alhambra, donde derribó algunos pedazos de la cerca della; ... fue tan grande este temblor y tantas veces que no había memoria de gentes que hubiesen visto otra cosa semejante” Tuvo su epicentro en las cercanías de Atarfe (24/03/1431 coordenadas 3°40’W-37°24’N) y fue provocado por la activación del sistema de fallas de Sierra Elvira. (Mezcua y Solares, 1983)

Del texto se pueden extraer dos datos principales. Uno de ellos es la caída de una de las partes de la muralla de la Alhambra y por tanto la profunda afectación que sufrirían otras partes

del conjunto no mencionadas en la crónica porque no llegaron a colapsar. De otro lado hay que señalar el que no hubiera memoria de un terremoto semejante. El primero de los datos habla de un daño producido de forma directa sobre el monumento, un dato de su vulnerabilidad estructural. El segundo dato indica un alto grado de *vulnerabilidad social*, de falta de capacidad de respuesta o interés sobre este asunto de la población, debido a periodos de recurrencia altos.

Del episodio de 1526 se conservan varios interesantes relatos, entre ellos el de Juan Vázquez de Echeverría de 1768 (Galbis, 1932) “(...) *experimentó Granada un terremoto tan violento, que cayeron a tierra muchas de sus Torres; y lo que es más de admirar, la antiquísima, y fuerte Torre Turpiana, que servía de Campanario a la Catedral, se movió con tanta violencia, que sacudió al suelo una de sus Campanas*” Esta torre Turpiana, que fue alminar de la mezquita mayor de la ciudad medieval de Granada, tuvo que ser demolida en 1588 ya que su estabilidad había quedado en un estado muy precario desde el episodio de 1526 (figura 1.1.a).

Daños sobre las estructuras patrimoniales en el entorno de Granada

Se analizan a continuación, de forma sintética, los daños existentes en las estructuras defensivas del entorno de la ciudad de Granada, comenzando por las situadas en la Alhambra y en particular por la Torre de Comares, por ser quizás esta la torre más representativa de todo el conjunto.

En el año 1644 se produjo un reconocimiento de daños por Miguel Guerrero y Juan López indicando la existencia de “*dos grietas en los pilastrones centrales que dan al norte sembraron la inquietud entre los encargados de la manutención de la Alhambra. Lo mismo ocurrió con la grieta que se abrió en el suelo, ya que llegaba hasta las bóvedas de los acuartelamientos subterráneos*” (figura 1.1.b)

Posteriormente, Leopoldo Torres Balbás refiere la aparición de una gran grieta por la diagonal en la fachada orientada al este, hasta lo alto de la torre, aparecida tras el terremoto de 1734 (intensidad VIII). Estas aberturas se cerraron con elementos metálicos (aspas de hierro) para evitar la ruina de la torre.

Otra torre que aparece muy fracturada es la conocida como Torre de las Gallinas (figura 2.1). Comparte con la de Comares su posición sobre el tajo de San Pedro, y su exposición a los sistemas de fallas que aparecen en él.

Las torres Quebrada y del Homenaje mantienen hoy día las fisuraciones que ya se podían ver en las imágenes tomadas por Jean Laurent entre los años 1871 y 1874 (Figura 1.2). Estas roturas tienen una trayectoria vertical a tercios o a medios de la fachada norte, existiendo otras series de fisuraciones en el resto de fachadas.

Respecto del grupo de torres situadas entre la de los Picos y la de las Infantas, hay que indi-

car que presentan también estados de fisuración en el material, aunque quizás no tan alarmantes como las del frente del tajo de San Pedro. Aparecen roturas vinculadas a los huecos y al sistema de apoyo en niveles con diferencias de cota muy acusadas. El mismo efecto aparece en el frente de torres situadas al suroeste, en particular en la torre del Capitán y en la torre de la Justicia.

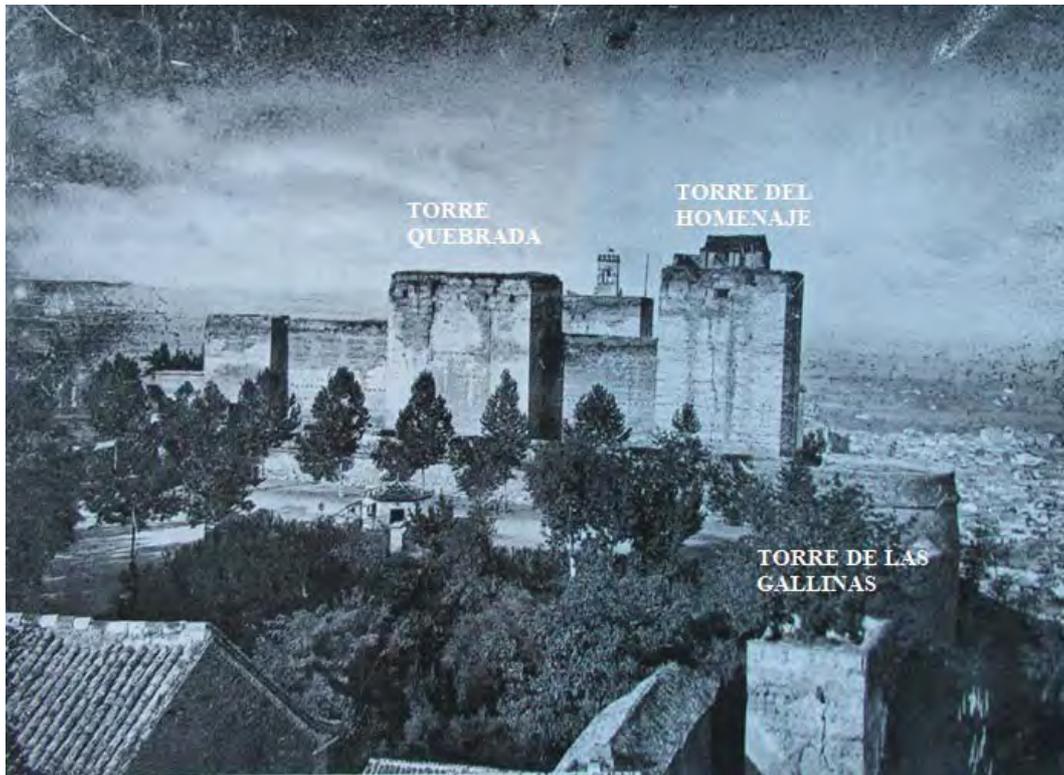


Figura 1.2: Fotografía de las torres Quebrada, del Homenaje y de las Gallinas. Jean Laurent 1871-1874. Archivo del Patronato de la Alhambra y Generalife

Todas estas fisuraciones mantienen el material de las torres fracturado en mayor o menor profundidad, anunciando que no se puede considerar el material de estas estructuras como macizo en el caso de hacer un estudio completo, profundo y realista de su estabilidad y su vulnerabilidad. Es necesario incluir la complejidad que estas fisuraciones suponen en los sistemas de análisis que se desarrollen, para trabajar sobre modelos lo más realistas posibles, y conocer el futuro desarrollo temporal de las mismas.

En el entorno de la ciudad de Granada existen un gran número de estructuras patrimoniales construidas con tapial que también han sufrido los efectos de terremotos pasados (figura 1.3), quedando alguna de ellas en un estado cercano a la ruina. El proyecto PREFORTI (Molina Gaitán *et al.*, 2020) llega a inventariar más de 240 estructuras patrimoniales de tapial sólo en las provincias de Granada, Almería y Murcia, con lo que el número de bienes patrimoniales potencialmente beneficiados por los datos que esta tesis aporta puede llegar a ser muy alto.

Condiciones sísmicas del entorno de la ciudad de Granada

La Península Ibérica se encuentra en uno de los bordes de la placa euroasiática, entrando en colisión con la placa africana. La presión ejercida entre ambas placas es la responsable de los movimientos sísmicos que aparecen en todo el mediterráneo. La resultante de las presiones en la Península presenta una dirección dominante con una componente noroeste – sureste, quedando por tanto los pliegues del terreno orientados de forma perpendicular a dicha resultante.



(a) Torre de Romilla. Chauchina, s.XIII-XV.

(b) Torre de Lojuela. Murchas, s.XII-XIII

Figura 1.3: Estado de conservación de torres defensivas en el entorno de Granada

Analizando los datos de sismicidad histórica se observa que la mayoría de los episodios se localizan en el sureste peninsular y mar de Alborán. Estos datos quedan recogidos en los mapas de Peligrosidad Sísmica, en los que la ciudad de Granada alcanza valores esperados de aceleración medida en roca de 0,26 g para un periodo de retorno de 475 años, y valores de 0,28 g para un periodo de retorno de 975 años.

El primero de los datos es el que aparece en la normativa sismorresistente en vigor (NCSE-02), como dato de diseño para edificaciones. El segundo de los valores, 0,28 g para un periodo de retorno de 975 años, es el que se debe utilizar al actuar sobre elementos o edificios con valor patrimonial, clasificados de “*importancia espacial*” por la normativa sismorresistente española y según lo indicado en la actualización de los mapas de peligrosidad sísmica de España de 2012 (Martínez Solares *et al.*, 2013). Del mismo modo el Eurocódigo 8 equipara las estructuras patrimoniales a las edificaciones clase IV, “*estructuras esenciales*”, mientras que el ATC-40

(Comartin *et al.*, 1996) utiliza también el periodo de 975 para los edificios históricos.

Si se revisan los trabajos realizados por el proyecto SISMOSAN en detalle para el marco físico de la ciudad de Granada y su entorno (Benito *et al.*, 2007) se obtienen valores de hasta 0,50 g en la zona de la cuenca de Granada, para un periodo de retorno de 975 años. Este dato demuestra por tanto que la peligrosidad del entorno puede calificarse de alta, siendo esta la causa principal del deterioro estructural de muchas de las edificaciones patrimoniales ejecutadas con tapial. A nivel documental se pueden citar los trabajos realizados en la inmediaciones de la Alhambra por Azañón *et al.* (2004), en el ámbito de Andalucía por Benito *et al.* (2010) o en la provincia de Murcia por Benito *et al.* (2006), que detallan el potencial sísmico de todo el sureste español de una forma más completa que la normativa vigente.

Para concluir se indica que en el caso del ámbito geográfico mencionado, y en particular en el caso de Granada, la fuente epicentral se encuentra en muchas ocasiones a distancias inferiores a los 25 km de los bienes patrimoniales, lo que provoca efectos de directividad de las ondas en el sentido de cizalla de la falla. De esta manera los mayores daños no se producirán únicamente por una mayor aceleración, sino por un determinado contenido de frecuencias y una larga duración (Azañón *et al.*, 2004). A este respecto hay que indicar que el epicentro del terremoto de 1431 se encuentra a escasos 14 km de la ciudad de Granada y de la Alhambra.

Capítulo 2

Antecedentes y objetivos

En este capítulo se compilan las normativas vigentes a nivel mundial sobre estructuras y materiales de tierra, y los trabajos de investigación más relevantes encontrados, que analizan las capacidades mecánicas del tapial o bien aplican sobre éste técnicas de bajo impacto similares a las utilizadas en esta tesis. Finalmente se indican los objetivos que se pretenden alcanzar en este trabajo de investigación.

Sobre el primero de los puntos sorprende ver lo escasa que es esta normativa, fruto de la falta de interés hasta ahora en este material. La normativa redactada se refiere al conjunto de reglas que se entienden como suficientes para conseguir un nivel de seguridad aceptable para la ejecución de nuevas edificaciones de tapial, sin que existan normativas adecuadas a la mejora del patrimonio ya edificado.

En relación a la investigación se podrá de manifiesto la gran disparidad de resultados obtenidos, causada a su vez por una diversidad de métodos de ensayo, dosificaciones y tipo de materiales utilizados.

2.1. Revisión normativa

Como ya se ha indicado, el tapial, al contrario que otros materiales y sistemas de construcción de muros de carga, no tiene un soporte normativo preciso, unificado o extenso, que permita su caracterización, diseño o comprobación de forma parecida en distintos países. Solamente en algunos se han redactado normativas propias para el tapial, utilizando muchas veces equiparaciones a otros materiales en cuanto a su esquema de análisis.

En el Reino Unido se publicó en el año 2007 el documento titulado *The rammed earth house*, y la asociación Building Research Establishment Limited editó en 2005 la norma *BRE.EP62 Rammed Earth: Design and Construction Guidelines* y en 2008 la norma *BRE.EP80 Earth Masonry: Design and Construction Guidelines*. Anteriormente en el Reino Unido se había re-

dactado la norma BS 5628:Part 1 en el año 1992. En Francia se publicaron en 2005 dos guías de diseño denominadas *L'architecture en Pisé dans le canton de Boén* y *Techniques de construction et de restauration* siendo éste segundo el único documento encontrado que se refiere a la restauración propiamente dicha. Alemania por su parte redactó en 1999 una normativa sobre la construcción con tapial, adobe y ladrillo de tierra comprimida, denominada *Lehmbau Regeln*. En España lo más parecido que existe es la norma *UNE 41410:2008, Bloques de Tierra Comprimida para Muros y Tabiques. Definiciones, Especificaciones y Métodos de Estudio*, que fue elaborada por el Subcomité Técnico AEN/CTN 41 SC10 Edificación con tierra cruda, y el documento *Bases para el diseño y construcción con tapial* editado por el MOPT.

Nueva Zelanda redactó una de las normativas más completas, la *NZ 4297. Engineering design of earth buildings*, publicada por la Earth Building Association of New Zealand en el año 1998. Por su parte Australia redactó en el año 2002 un manual llamado *The Australian earth building handbook*, donde se recogen algunas recomendaciones en cuanto al material a utilizar, así como consejos sobre las dimensiones mínimas de muros y distancia entre huecos y su tamaño máximo.

En Estados Unidos existen ensayos normalizados para la construcción en adobe estabilizado, recogidos en las normas *ASTM D559-44* y *D560-44*, analizando la capacidad a compresión, resistencia a la flexión, ciclos de humedad-sequedad, absorción y erosión. Además, existen otra serie de normas y recomendaciones como son la *UBC-1958*, *REEF-CSTB*, algunas recomendaciones de la ONU y las redactadas en Perú sobre adobe estabilizado a través de su Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda (ININVI) que publicó la *Norma para la Construcción con Adobe* (González *et al.*, 1997).

Zimbawe publicó en 2001 la norma *Zimbabwe Standard of Practice for Rammed Earth Structures SAZS 724*, Sri Lanka tiene la norma *SLS 1382, Sri Lanka Standard Specification for Compressed Stabilized Earth Blocks* y Bután está actualmente en vías de redactar su propia normativa con la ayuda de la Universidad de Cambridge (Sethna, 2008).

Existen otras normativas publicadas en Brasil, India, Kenia o Túnez, para un total de 55 documentos normativos a nivel mundial. Todas ellas pueden consultarse en el trabajo de Cid *et al.* (2011). Como se puede comprobar, las citadas normas únicamente aportan valores mecánicos exigibles a los bloques de tierra comprimida y a los adobes, sin que exista ninguna que lo haga de manera específica para el tapial.

Se puede por tanto concluir que el ámbito normativo se encuentra aún en vías de desarrollo, de forma paralela al nuevo interés que el uso del tapial está despertando. Varios países han redactado guías, documentos de recomendaciones o manuales que recopilan técnicas constructivas, que si bien son documentos precisos y útiles, no forman cuerpos normativos. En otros casos los documentos se centran en el control sobre la fabricación de bloques de adobe, siendo muy escasas las normativas que como tales se centren en el tapial y sus circunstancias. Es también, en parte, intención de esta tesis avanzar un poco más en el conocimiento del tapial para poder suministrar datos o técnicas que fomenten la redacción de un documento normativo que regule, y fomente, el uso del mismo.

2.2. Investigaciones más significativas

A continuación se recoge, a modo de compilación, los datos existentes en la literatura en relación al estudio de las características mecánicas del tapial. Para ello se relacionan seguidamente los autores consultados, de los que se realiza un resumen del contenido de sus trabajos, quedando indicados en la tabla 2.1 un resumen de los valores obtenidos por cada uno de ellos.

***González et al. (1997)* Estudio de los materiales y de las fábricas de la Torre de Comares de la Alhambra.**

Descripción

En este artículo se caracterizan mecánica y físicamente los principales materiales componentes la Torre de Comares, que presenta muros de tapial de unos tres metros de espesor reforzados por ladrillo en las esquinas.

Para la caracterización física del tapial se determina la densidad aparente, la distribución porosimétrica y la capilaridad. Los valores de densidad aparente obtenidos oscilan entre los 2,14 y 2,31 g/cm³

Respecto de la caracterización mecánica se evalúan los parámetros de resistencia a compresión, resistencia a tracción indirecta (mediante el ensayo brasileño) el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. Para ello el autor extrae probetas de material de los tapias de la torre, a razón de nueve muestras del tapial de la cimentación y dos del tapial de la estructura.

Los valores medios obtenidos para resistencia a compresión fueron de 115 kp/cm² en las probetas provenientes de la cimentación y 25 kp/cm² en las de la estructura. Del mismo modo los valores para resistencia a tracción fueron de 15,33 y 3,00 kp/cm² respectivamente para la cimentación y la estructura. Los valores de módulo de elasticidad se calcularon en 63.000 y 9.400 kp/cm² (cimentación y estructura) y el Coeficiente de Poisson entre 0,20 y 0,30.

Se utilizan además técnica de bajo impacto (N-MDT non/minor destructive diagnosis techniques) como son la termografía, la endoscopia y el gato plano. De los dos primeros no obtiene datos relevantes para nuestro estudio, mientras que del tercero obtiene los valores de 3,28 y 6,15 kp/cm², sin acompañar estos resultados de datos de deformación.

Comentario

Este artículo nos proporciona valores reales tomados sobre tapias históricas, de los que debemos destacar que pertenecen a una muralla-torre palacio por lo que la riqueza del contenido en cal debe ser muy superior al resto de tapias y muy superior también a las mezclas habituales elaboradas en laboratorio. Hace uso de técnicas N-MDT, si bien los datos que extrae no son claros. Se echa en falta un análisis del material, que hubiera proporcionado datos a

cerca de su granulometría y de su composición mineralógica.

Datos obtenidos

Densidad ρ (g/cm ³)	Compresión f_c (MPa)	Tracción f_t (MPa)	Mód. Elástico E (MPa)	Coef. Poisson ν -
2,31	11,28	1,50	6178	0,20
2,14	2,45	0,29	922	0,30

Aymat (2000). Patología y rehabilitación de cajones de tapial.

Descripción

Tras un listado inicial de las características físicas del material, el artículo continúa indicando la importancia que supone la realización de estudios previos y ensayos para conocer las características y comportamiento de las fábricas de tapial antes de proceder a una rehabilitación. Para este autor resulta fundamental la determinación de los límites de Attemberg e índice de plasticidad para caracterizar el material.

Se proponen una serie de ensayos de caracterización mineralógica que deben incluir análisis químicos de muestras extraídas sobre los muros, dando especial importancia a conocer los porcentajes de sílice, óxidos de calcio, hierro y magnesio, y la materia orgánica contenida en la misma.

En un segundo paso se indica que se debe conocer la composición granulométrica, en porciones de material retenido en los sucesivos tamices, para conocer el porcentaje de áridos, limos y arcillas, para poder clasificar el suelo origen del muro. Aporta importantes conclusiones, destacando que los mejores resultados se obtienen en las mezclas que tienen cal adicionada en la masa, o colocada de forma económica formando los *calicostrados*. Del mismo modo indica que la adición de pinturas o productos comerciales, consolidantes o hidrofugantes, aumenta el deterioro de la fábrica frente al agua de lluvia. Así mismo abre una vía de investigación sobre la idoneidad de adicionar azufre y parafina a los tapiales.

Alude también a un tipo de protección y mantenimiento de los muros de tapial, en los que detecta que las zonas más vulnerables son las coronaciones, las zonas cercanas al suelo y las juntas entre cajones.¹

Estas fábricas son muy resistentes a la temperatura y malas conductoras del calor. Esta propiedad, que tiene grandes ventajas en otros campos, puede provocar que en elementos de gran espesor y fuertemente expuestos se produzca un gran diferencial de temperatura entre el exterior y el interior del muro, con lo que se pueden iniciar microfisuraciones en el interior del mismo, con el consiguiente deterioro y disminución de su resistencia.

¹Tal y como se indicaba al describir las cintas de mortero de cal que se colocaban en las juntas de los cajones de tapial de las murallas medievales (Figura 3.14).

Datos obtenidos

Densidad ρ (g/cm ³)	Compresión f_c (MPa)	Tracción f_t (MPa)	Mód. Elástico E (MPa)	Coef. Poisson ν
2,00	1,50	0,30	-	-

Hall y Djerbib (2004). Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency.

Descripción

En este trabajo los autores aportan algunas recomendaciones sobre dosificaciones y capacidades del material. Habren una pequeña discusión sobre si el material debe o no estar seleccionado, mostrando la gráfica que la British Standard BS1377 tiene sobre la distribución del tamaño de partículas, que finalmente usa en sus muestras.

Realiza diez mezclas con diferentes relaciones entre los componentes arena, grava y limo-arcilla, obteniendo cuatro probetas de cada una de las mezclas-dosificaciones. De esta manera intenta reducir las variables que presenta la utilización de una tierra tomada de un determinado lugar, como pueden ser la composición mineralógica, la forma del grano o árido y la distribución de partículas.

Desarrolla la importancia que tiene lograr una correcta cantidad de agua en la mezcla, en la que un defecto de humedad puede hacer que el material no alcance un nivel de compactación suficiente debido a la fricción entre las partículas, mientras que un exceso de humedad formará redes capilares, reduciendo además la capacidad de compactación y aumentando la porosidad del material una vez seco. En todas las mezclas de suelo que utiliza en sus probetas el contenido de humedad está entre un 7 - 9 % respecto a la masa de suelo seco.

Sobre los encofrados del tapial utiliza aceite como "desencofrante" y hace la compactación con un pisón manual si bien ésta se realiza con la caída del mismo desde una determinada altura y en un número establecido de golpes, imitando el ensayo proctor. Finalmente refrenta las probetas con un mortero de tierra compactado.

Las probetas se curan en unas condiciones de humedad relativa del 75 % y temperatura de 20°C. La contracción sufrida por las muestra muestra un valor inferior al 2 % de la fracción de aglutinante, que se estima insignificante dado que el máximo valor de éste nunca es mayor del 40 %. Visualmente se observa como las probetas que tienen una mayor cantidad de aglutinante manifiestan fisuraciones por contracción, si bien siguen presentando un aspecto sólido y duro.

Continúan los autores con las pruebas para determinar la carga máxima a compresión, en la que sólo cuatro de los diez tipos de suelo cumplen con el requisito que establece como mínimo de 1,30 MPa.

Realiza una tabla con los resultados en los que compara la carga máxima a compresión y la densidad seca del material empleado para cada una de las mezclas de suelo. Indica que no existe relación directa entre la variación de la densidad seca y la resistencia a compresión característica, estando quizás más relacionado este valor con los ratios entre agregados y aglutinantes. Así relaciona la capacidad a compresión del material a la proporción entre los agregados y el aglutinante, de forma que las mezclas con una dosificación entre ambos de 3:1 son las más resistentes.

Datos obtenidos

Densidad ρ (g/cm ³)	Compresión f_c (MPa)	Tracción f_t (MPa)	Mód. Elástico E (MPa)	Coef. Poisson ν
2,09	0,75 - 1,46	-	-	-

Maniatidis y Walker (2008). Structural Capacity of Rammed Earth in Compression.

Descripción

Comienza el artículo con una relación de la normativa existente a nivel mundial respecto de la construcciones en tierra, si bien el punto fuerte de este documento está en las nueve probetas que ensayan. Es uno de los artículos más citados en la investigación sobre tapial, ya que fue un de los primeros en aportar datos mecánicos sobre diferentes tamaños de probetas. Las probetas son columnas de 1,80, 2,40 y 3,00 m de altura por un área de 30x30cm sobre las que obtiene datos de carga máxima a compresión. También realiza una serie de ensayos sobre probetas de menor tamaño, de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura y de 300 mm de diámetro y 600 mm de altura.

Los resultados de los ensayos de compresión muestran que los valores disminuyen en función del aumento del tamaño de las probetas, atribuyendo dicho efecto al aumento de contenido en grava de las probetas medianas y de gran tamaño, y la mayor humedad en el interior de las mismas. El material utilizado en las probetas de menor tamaño ha sido tamizado, por lo que la granulometría está más acotada al rango de los finos.

Se describe el desarrollo de las grietas sobre las probetas sometidas a los ensayos de carga, que comienza con una fisura en el centro de la pieza que va avanzando hasta la parte superior e inferior de la muestra. Una vez aplicada la carga sobre las columnas se obtienen datos sobre su carga última, que repite el patrón de tensión-deformación de las probetas, hasta provocar la rotura de las columnas de forma frágil. El autor realiza también ensayos sobre la reducción de capacidad que aparece en las columnas al someterlas a un 10 y un 30 % de excentricidad en la carga.

Comentario

Se pone de manifiesto en este documento la importancia del tamaño de la probeta en la realización de pruebas de laboratorio, pudiendo llegar a tener valores con una variación de hasta un 50 %. Las condiciones de ejecución de las probetas y las de su *curado/envejecimiento* pueden hacer que los resultados varíen en esa proporción.

Al crear probetas de una gran esbeltez para el tapial (con relación entre 6 y 10), puede que los resultados obtenidos queden muy vinculados a la forma, pudiendo quizás tener mayores valores de resistencia a compresión si con el mismo material y grado de humedad tuviera una forma más cercana a un muro en lugar de las columnas utilizadas.

Datos obtenidos Valores sobre las columnas.

Densidad ρ (g/cm ³)	Compresión f_c (MPa)	Tracción f_t (MPa)	Mód. Elástico E (MPa)	Coef. Poisson ν
1,92	0,81	-	65	-

Bui y Morel (2009). Assessing the anisotropy of rammed earth.

Descripción

Los autores de este artículo plantean una posible anisotropía del material, por la cual las características mecánicas podrían ser diferentes en las direcciones perpendiculares y paralelas a las capas de formación (tongadas) de los tapias. Todos los estudios previos sobre características mecánicas de los tapias a compresión se centraron en ensayos de cargas actuando de forma perpendicular a las capas de la tierra, es decir, la dirección en la que el muro recibe las cargas gravitatorias. Los autores desarrollan un sistema de ensayo del comportamiento a compresión del tapial con la carga aplicada de forma paralela las capas de tierra. El conocimiento de este comportamiento es de interés para poder calcular la capacidad de los muros de tapial bajo cargas sísmica, así como el coeficiente de seguridad bajo cargas laterales.

Las muestras son ensayadas con carga paralela a las capas del material, produciéndose separaciones entre las tongadas, y siguiendo a partir de entonces cada capa aguantando la carga por separado. No se aprecia alteración en la capacidad del material, no hay cambios en la curva tensión-deformación incluso después de las roturas de laminación entre capas.

Indican que el comportamiento de la tierra como material de construcción, y en particular del tapial, es elástico no lineal, por lo que proponen el uso del Módulo de Rotura (relación entre la tensión máxima y su correspondiente deformación) para caracterizar estos materiales. En las pruebas que realiza lo calcula en torno a los 70 MPa para ambas direcciones de carga. Respecto a la tensión de compresión la diferencia que obtiene entre las dos opciones de carga es inferior a 10 %, con valores entre 0,92 y 0,84 MPa.

Finalmente apuntan que un muro completo se debe tratar como un material discontinuo

formado por sucesivas capas, con una ley que controle la fricción entre las interfases, en la que se hace necesario conocer el ángulo de rozamiento interno del material. Se propone el uso de un ensayo de cizalladura (caja de corte directo) para obtener el valor de dicho parámetro. De esta manera los autores indican que si la separación se produce cerca del fallo del material la hipótesis de un comportamiento elasto-plástico isotrópico puede ser cierta. En el caso contrario el material se parecería más a una fábrica de bloques colocados en seco.

Datos obtenidos

Densidad ρ (g/cm ³)	Compresión f_c (MPa)	Tracción f_t (MPa)	Mód. Elástico E (MPa)	Coef. Poisson ν
1,82 - 1,98	0,84 - 0,92	-	-	-

Ciancio y Augarde (2013). Capacity of unreinforced rammed earth walls subject to lateral wind force: elastic analysis versus ultimate strength analysis.

Descripción

En este artículo las autoras comienzan indicando que es necesario tener una normativa sobre el uso del tapial en construcción para evitar el uso de reglas empíricas que pueden dar lugar a un uso de material superior al necesario.

Entrando en detalle, se comparan los resultados analíticos y experimentales de dos tipos de análisis, elástico y de límite de rotura, mediante la carga lateral de un muro de tapial *estabilizado con cemento* y sin coacciones en altura. En el artículo se incluyen también una caracterización del suelo utilizado.

La comparación pone de manifiesto que el análisis elástico puede predecir con precisión la capacidad del muro, mientras que el análisis de resistencia a la rotura subestima significativamente la carga máxima lateral que el muro puede resistir de forma real. En la última parte del artículo las autoras modifican el análisis de resistencia a la rotura para tener en cuenta la contribución de la energía de fractura, lo que conduce a una mejora importante en la precisión. Se crean especímenes de altura 1200 mm, anchura 600 mm y espesores de 50, 100 y 150 mm, sobre los que se aplica una fuerza lateral mediante un airbag. En la cabeza del muro se aplica una fuerza de unos 1,5kN que simula la carga de un hipotético tejado. La existencia o no de esa carga hará que la localización de la fractura en el muro varíe su altura.

Las capacidades mecánicas las obtiene mediante muestras construidas en moldes y otras sacadas de las zonas no dañadas del tapial una vez terminadas las pruebas de presión horizontales. Las primeras las somete a ensayos de capacidad a compresión y a tracción (indirecta), mientras que las segundas lo son a compresión y a flexión (usado para conocer el comportamiento a tracción de las interfases entre capas).

De forma inicial se puede indicar que en todos los casos las muestras fabricadas en moldes tienen unas capacidades inferiores a las muestras obtenidas sobre el propio tapial. Así mismo las muestras con un contenido inferior en humedad presentan mayores capacidades a compresión, mientras que ese dato tiene una importancia menor en los resultados a tracción indirecta y flexión.

Como ya se indicó previamente la comparación entre los resultados experimentales y los analíticos pone de manifiesto que los resultados calculados mediante el análisis elástico coincide con los obtenidos sobre las probetas. Las autoras indican que si la tensión de tracción está calculada con exactitud es posible predecir la capacidad de carga lateral del muro (carga perpendicular al plano). No ocurre así en el caso del análisis a rotura, donde los resultados son muy dispares.

Los resultados mejoran notablemente si se introduce la energía de fractura del material en las ecuaciones utilizadas. El modelo elegido es el curvo descrito por Hillerborg que tiene la siguiente forma $G_F = \alpha f_t \delta_{max}$ donde se adopta un valor de $\alpha = 0,15$, siendo este valor α el propio del hormigón en masa. De forma analítica se observa que el valor de la presión que el muro es capaz de soportar aumenta linealmente con el valor de α , siendo mayor cuanto mayor es el espesor del muro. Por otro lado la localización de la rotura no varía en exceso con el aumento del valor de α , tendiendo a ser $h/2$ cuando α tiende a infinito.

Comentario

Las autoras utilizan el material estabilizado con un cemento en una proporción del 8 % del peso del árido. Fabrican y obtienen muestras del tapial y las someten a los ensayos habituales para el hormigón en masa. Es constante la similitud que hacen entre los dos materiales.

De forma inicial indicar que en todos los casos las muestras fabricadas como probetas tienen unas capacidades mecánicas inferiores a las muestras extraídas sobre el muro de tapial.

Incorpora un valor de α de 0,15, si bien indica que dicho valor debería ser objeto de investigaciones futuras. Es evidente que a mayor valor de energía de rotura mayor valor de tensión máxima de tracción tendrá el material, por lo que se hace muy interesante poder incorporar aditivos que mejoren dicho valor, además de encontrar un método para evaluarlo de manera fiable.

Datos obtenidos

Densidad ρ (g/cm ³)	Compresión f_c (MPa)	Tracción f_t (MPa)	Mód. Elástico E (MPa)	Coef. Poisson ν
1,86	15,00	0,80	-	-

Lombillo et al. (2014). In situ mechanical investigation of rammed earth: Calibration of minor destructive testing.

Descripción

En este artículo se utilizan técnicas de bajo impacto (N-MDT non/minor destructive diagnosis techniques) sobre un muro de tapial construido con una determinada proporción de materiales, para conocer su capacidad mecánica y comparar los datos así obtenidos con otros procedentes de los sistemas habituales. Dichas técnicas N-MDT son el *flat jack*, *hole-drilling* y *mini-presurómetro*. Éstas permiten conocer parámetros mecánicos del material con un *factor de daño* muy reducido sobre el espécimen, que puede llegar a ser una estructura real. En este caso se construye un muro de tapial de 210 x 113 x 38 cm (L x H x W) sobre el que se aplican los ensayos que se describen a continuación.

El *flat jack*, o gato plano, necesita hacer un corte en el muro de unos 200 mm de ancho por unos 120 mm de profundidad y 20 mm de espesor en el que introducir el instrumental. Mediante puntos de control por pares a cada lado del corte se puede controlar la deformación que una determinada presión en el plano introduce en el espécimen. En el artículo se indican los problemas que la lenta compactación del material producen en el ensayo, y la forma de solucionarlo. Mediante esta técnica (y su uso combinado como doble flat jack) se pueden obtener valores de tensión de compresión, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

El segundo de los métodos empleados es el *hole-drilling*. Esta prueba consiste en la medición de deformaciones antes y después de ejecutar una perforación concéntrica de 36 mm de diámetro y 32 mm de profundidad. Mediante los datos obtenidos por una serie galgas extensiométricas colocadas de forma radial a la perforación se pueden deducir combinaciones de deformación con las que obtener las tensiones principales y sus direcciones.

Como última de las técnicas utilizadas, el *mini-presurómetro* necesita crear un taladro en el material de unos 400 mm de longitud y 34 mm de diámetro. En dicho espacio una membrana flexible actúa bajo los efectos de un líquido introducido a presión. Midiendo la relación entre presión y volumen inyectado se puede obtener el módulo presurométrico E_{PMT}

Los datos obtenidos mediante estas técnicas se comparan con los valores obtenidos de ensayos de compresión sobre ocho probetas, construidas con el mismo tipo de suelo, logrando resultados bastante cercanos.

Comentario

El uso de estas técnicas N-MDT es novedoso para este material. Existe literatura respecto a su uso en muros de fábrica de ladrillo, mampostería y sillares, pero no sobre muros de tapial, salvo los trabajos realizados por [González et al. \(1997\)](#). Resulta un campo interesante de investigación que proporciona datos sobre estructuras reales, si bien requieren de una pequeña afección al material. Quizás hubiera sido interesante extraer las probetas del mismo muro ensayado, sin tener que ser fabricadas aparte, aunque sus resultados sean bastante coincidentes.

Se puede también discutir sobre cuál de las técnicas empleadas es más fiable a la hora de caracterizar el material, o cuál de ellas lo son para un determinado parámetro. Hay además algunos problemas inherentes al tapial que el autor entiende como puntos a desarrollar, entre otros la falta de concordancia en los datos obtenidos de módulo de elasticidad.

Datos obtenidos

Densidad ρ (g/cm ³)	Compresión f_c (MPa)	Tracción f_t (MPa)	Mód. Elástico E (MPa)	Coef. Poisson ν
-	1,06 - 1,45	-	42 - 3171	-

Miccoli et al. (2014). Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob.

Descripción

En este artículo se realizan ensayos a compresión y a cortante sobre especímenes de fábricas de bloques de tierra, tapiales y cob². Aportan resultados de tensión de compresión, tensión a cortante, carga de rotura, módulo de elasticidad y módulo de poisson.

Menciona, una vez más, la gran dispersión de datos que existe en la literatura, en la que anota además que no sólo se debe a que el material no tiene un proceso industrial en su fabricación (con diversidad de porcentajes en los agregados que lo forman) sino que además las formas de ensayar las probetas no están estandarizados.

A nivel compositivo del material expone las consecuencias de la baja humedad que presenta el tapial, en relación con las otras dos tipologías, así como la amplia clasificación de las partículas que lo componen, y que van desde la arcilla a la grava. Los autores mencionan también las costumbres locales de adicionar cal a la masa, así como reforzar la fábricas con la inclusión de líneas de ladrillo (verdugadas) o de fibras naturales. Remiten también a un estudio de [Quagliarini y Lenci \(2010\)](#) en el que se estudia el comportamiento de bloques de adobe históricos mejorados con fibras y adicciones. Refieren también el trabajo de [Dierks y Stein \(2002\)](#) sobre los parecidos en el comportamiento del tapial y el hormigón en masa.

Para su investigación fabrican probetas de 500 x 500 x 110 mm³ que son sometidas a ensayos de compresión axial y diagonal. En el primero aparecen fisuraciones que esbozan la imagen de un doble cono, tal y como ocurre con las probetas de homigón en masa. Para el segundo grupo de ensayos utiliza además una cámara fotogramétrica, con lo que son capaces de conocer el estado de fisuración del material en cada uno de los pasos de carga a que está sometido. Indica además que la interfase entre las distintas capas que forman el tapial produce una debilidad al

²El cob es una estructura de tierra formada a base de la sucesiva acumulación de masas de tierra, sin moldes ni compactación, lo que lo distingue de los adobes y tapiales, creando por tanto edificios de formas redondeadas y orgánicas. Su uso está muy extendido en el Reino Unido. Para una mayor información se puede consultar [Watson y McCabe \(2011\)](#).

especimen. En los diagramas de tensión deformación de los ensayos de compresión se aprecia una primera zona que podríamos denominar como *zona de ajuste de compactación*, hasta que el espécimen comienza a reaccionar contra el actuador.

La conclusión del programa de ensayos es que la cantidad de arcilla, el contenido en agua y el nivel de compactación son los parámetros dominantes en la resistencia a cortante del tapial. También nos indican que el tapial es un 40 % más resistente que las fábricas de adobe en caso de un sismo.

Comentario

El artículo muestra de forma muy bien estructurada los ensayos realizados sobre diferentes fábricas de tierra y sobre un número importante de probetas de tamaño medio. En lo referente al tapial el uso de la cámara fotogramétrica unido a los diagramas de tensión-deformación muestra de una manera muy gráfica el ablandamiento que sufre el material. Hace además una buena relación de otros trabajos anteriores. El estudio se enmarca dentro del proyecto NIKER de la Comisión Europea.

Datos obtenidos

Densidad ρ (g/cm ³)	Compresión f_c (MPa)	Tracción f_t (MPa)	Mód. Elástico E (MPa)	Coef. Poisson ν -
2,19	3,73	0,71	4143	0,27

***Miccoli et al. (2015)* Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling.**

Descripción

Este artículo, escrito en parte por los mismos autores de [Miccoli et al. \(2014\)](#), utiliza los datos obtenidos previamente para incorporarlos a un análisis por elementos finitos. En dicho análisis distingue entre el comportamiento del material, al que asigna un modelo de comportamiento *strain rotating crack* y el comportamiento de las interfases de contacto de las capas, al que asigna un criterio de fallo de Mohr-Coulomb.

Respecto del uso de los FEM se ha utilizado el programa DIANA 9.4 para realizar dos modelos, uno como una pieza continua y homogénea y otra en la que se han modelizado las interfases entre capas, para reproducir los fallos de laminación. Sobre estos modelos sintéticos se han reproducido las condiciones de carga y de contorno de los modelos reales.

Los valores iniciales los toma de los obtenidos previamente, mientras que los valores de comportamiento no lineal los obtiene como relaciones a partir de la carga máxima de compresión. Los valores necesarios para implementar el modelo de Mohr-Coulomb también los obtiene

de formulaciones, basándose en que no hay datos en la literatura y los toma por tanto de valores de fábricas históricas, si bien no cita las fuentes.

Realiza también un análisis de sensibilidad de los parámetros introducidos, modificando sus valores y obteniendo que la tensión de compresión, la tensión de tracción, el coeficiente de Poisson y la energía de fractura son los parámetros más influyentes. Indica además, de forma interesante, que el espesor de las tongadas de material al fabricar los tapiales tiene un efecto directo sobre su resistencia, de manera que a menor espesor de tongada mayor densidad y por tanto mayor resistencia.

Comentario

Este artículo complementa el anterior y de hecho se basa en aquél para obtener datos de partida. Crea dos modelos sintéticos a los que somete a los mismos esfuerzos que las probetas reales previamente ensayadas. Se calibran los modelos mediante un proceso iterativo para lograr que los valores de tensión encajen dentro de los datos reales. Una vez conseguido se observa que los modelos responden de manera aproximada a las probetas reales.

Toufigh y Kianfar (2019). The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts.

Descripción

Los autores de este artículo realizan una serie de probetas con distintos aditivos para comprobar la forma en la que éstos afectan a los parámetros mecánicos y al comportamiento del tapial frente a la temperatura o la humedad. Así, fabrican algunas probetas sin estabilizar, y otras con la adición de cemento, puzzolana, microsilica, goma guar, fibra de vidrio y materiales con cambio de fase, sin que pueda por tanto entenderse que los tapiales ejecutados en las probetas recreen un material tradicional. Las probetas son sometidas a varios ensayos de los que destacan los de carga a compresión, carga a tracción (brasileño), y velocidad de pulso ultrasónico, entre otros. Logra interesantes relaciones entre los valores obtenidos por técnicas destructivas y los datos aportados por los ensayos de UPV.

Introduce un nuevo parámetro en el estudio de probetas de tierra, la absorción de energía, indicando que puede convertirse en un parámetro crítico para evaluar el material bajo cargas de impacto como son los terremotos. Indica a este respecto que las probetas a las que se les ha añadido fibra de vidrio muestran un comportamiento más dúctil, mientras que las estabilizadas con cemento son las que obtienen un menor valor. Como resultado final recomienda la adición de puzzolana como la más acertada para mejorar de forma general las condiciones de las estructuras ejecutadas con tapial.

Comentario

El uso de la fibra para mejorar el comportamiento a tracción del tapial ya aparece en el trabajo de [Corbin y Augarde \(2014\)](#) llegando a la conclusión de que no mejora el comportamiento global de las estructuras. El problema reside en el propio sistema de ejecución de los tapias, mediante tongadas. La fibra puede estar presente y mejorar el comportamiento de cada tongada, pero no es capaz de crear conexiones entre las distintas tongadas, por lo que no es capaz de mejorar la capacidad del material en su conjunto. En este caso la analogía del tapial con el hormigón en masa no es posible, ya que la forma en la que se ejecutan cada uno de ellos es totalmente distinta.

Datos obtenidos

Densidad ρ (g/cm ³)	Compresión f_c (MPa)	Tracción f_t (MPa)	Mód. Elástico E (MPa)	Coef. Poisson ν
1,97	3,70	0,47	586	-

Hussaini y Toufigh (2019). Strength and fracture behavior of rammed-earth materials.

Descripción

En este artículo se incide en las ventajas económicas y medioambientales del tapial, al ser un material que no consume recursos naturales y con una técnica de construcción de bajo coste, además de poder ser perfectamente reciclable. Indica también sus desventajas, como el mal comportamiento de su estabilidad dimensional ante la presencia de agua o su baja capacidad mecánica, en particular en las sollicitaciones de cortante causadas por terremotos. Al igual que en el trabajo de [Toufigh y Kianfar \(2019\)](#), se confeccionan una serie de probetas con distintos estabilizantes como son cemento, puzzolana, microsilica, goma guar, fibra de vidrio y materiales con cambio de fase. Posteriormente obtiene de ellos sus valores de caracterización mecánica más habituales, encontrando que las probetas estabilizadas con cemento son las que presentan valores más altos de carga máxima a compresión, carga máxima a tracción y módulo de elasticidad. También mide el comportamiento y velocidad de pulsos ultrasónicos en las probetas. Los aditivos menos competentes son la goma guar y los materiales con cambio de fase, que llegan a crear películas que impiden el correcto pegado entre las partículas del suelo.

Finalmente realiza un análisis con microscopía electrónica para conocer el comportamiento a nivel mineralógico de los componentes de los materiales utilizados.

Comentario

Al igual que en el caso anterior en uso de fibras de vidrio para aumentar los valores de energía de fractura pueden ser discutibles por el propio sistema de ejecución de los especímenes. Los autores solucionan este problema ensayando la probeta girada, lo que evita el problema de

la posible laminación o efecto de separación de las tongadas durante el ensayo. Aún así los valores obtenidos en relación a las probetas estabilizadas con cemento son muy parecidos.

***Shrestha et al. (2020).* In-Plane shear resistance between the rammed earth blocks with simple interventions: experimentation and finite element study.**

Descripción

En este trabajo se ejecutan cuatro bloques de tapial de gran tamaño (1,2 m de longitud, 1,2 m de altura y 0,6 m de anchura) con dos espesores de tongadas distintos, 120 y 60 mm. La diferencia de comportamiento de los muros con distinto espesor de tongadas es uno de los aspectos estudiados, encontrando que los muros con tongadas de 60 mm tienen un mejor comportamiento antes los ensayos a los que son sometidos. A la vez analiza el comportamiento de probetas en dos momentos temporales concretos, un mes después de su ejecución y seis meses después, encontrando que las probetas de más edad presentan valores de tensión máxima a compresión un 120 % superior a las ensayas al mes de su ejecución.

Lo más significativo del trabajo son los grandes bloques que se ejecutan, con dos cajones por bloque de 60 cm hasta alcanzar los 1,20 m del total del muro. Estos muros son ensayados para conocer su capacidad máxima a cortante en conjunto, insertando pequeños dados de hormigón en la zona de contacto de los cajones a modo de llave o dovela, con la finalidad de mejorar la capacidad a cortante del conjunto. Simula las condiciones en un modelo de elementos finitos, demostrando que la zona que recibe la presión del dado de hormigón es la más cargada, con unas tensiones de 0,38 MPa. Reconoce además el movimiento que se produce a través del plano de contacto de los cajones. Indica también que a mayor número de dovelas insertadas entre los dos cajones mayor capacidad de respuesta del conjunto.

Comentario

Se puede entender que la diferencia en el espesor de las tongadas provoca una diferencia en la densidad del material, ya que las tongadas más pequeñas tienden a ser más compactas. Como era de esperar el valor de tensión a compresión de las probetas con menor cantidad de agua (más secas) es mayor, como ya se ha pone de manifiesto en estudios anteriores (*Bui et al., 2014*), (*Miccoli et al., 2014*). El uso de dovelas de hormigón entre los cajones de los muros es una forma de mejorar el conjunto de la estructura, si bien se aleja de un análisis del propio material del tapial.

Datos obtenidos

Densidad ρ (g/cm ³)	Compresión f_c (MPa)	Tracción f_t (MPa)	Mód. Elástico E (MPa)	Coef. Poisson ν -
2,08	0,56	0,11	67	0,15

Muzikova et al. (2018). Determining fracture energy of unstabilised rammed earth by using three-point bending test.

Descripción

Este trabajo es quizás el único que se ha localizado en el que se obtienen valores de energía de fractura sobre probetas de tapial, ejecutadas utilizando como estabilizante arcilla tipo montmorillonita e illita-caolinita. Se recrean pequeñas probetas paralelepípedas de 40x40x160 mm y se conservan en cámara de curado hasta su ensayo. Para la obtención del valor de energía de fractura utilizan el ensayo de tres puntos, según las indicaciones de **RILEM:TCM-85 (1985)**. De este modo calculan G_F con valores entre $20,57 \pm 4,32$ N/m y $7,46 \pm 0,43$, correspondiendo los primeros a las probetas ejecutadas con arcilla tipo montmorillonita y la segunda a las ejecutadas con illita-caolinita.

Comentario

Cualquier intento de ampliar el conocimiento sobre el tapial sometido a esfuerzos es digno de elogio. En este caso quizás se echa de menos que las probetas hayan tenido un tamaño algo mayor, para evitar los problemas de efecto de forma, como se indica en **Cifuentes y Medina (2013)**, o que se hubiera indicado la relación entre los materiales utilizados. Tampoco indica nada en relación a la forma de contrarrestar el peso propio de la probeta durante el ensayo o la longitud de entalla realizada.

Datos obtenidos

Densidad ρ (g/cm ³)	Fractura G_F (MPa)	Compresión f_c	Mód. Elástico E	Coef. Poisson ν
2,07	20,57 - 7,46	-	-	-

2.3. Resumen de datos obtenidos de las investigaciones más significativas.

Como se puede observar en la tabla 2.1 existe una gran disparidad en los datos obtenidos por los autores consultados. Sólo los relativos a densidad y coeficiente de Poisson tienen valores cercanos entre sí en los distintos trabajos. Estas diferencias tienen su origen en la diversidad de dimensiones de las probetas utilizadas, tipo de compactación, de curado, humedad interior de las probetas, además de las distintas proporciones y calidades en las tierras utilizadas (grava, arena, limo y arcilla), tal y como se ha ido indicando en los trabajos reseñados. De forma repetida se ha indicado como las dosificaciones cercanas a una relación 3:1 entre agregados y aglutinantes y con baja humedad son las que presentan mejores resultados. Del mismo modo, todos los autores mencionan la densidad como uno de los factores de mayor influencia en la capacidad del tapial. Los datos de [González et al. \(1997\)](#) que se relacionan en la tabla 2.1 son los correspondientes a la cimentación de la torre (fila 1) y estructura (fila 2). Los datos de [Toufigh y Kianfar \(2019\)](#) corresponden con la dosificación de 5 % de cemento. Por su parte los datos indicados en [Muzikova et al. \(2018\)](#) son para densidad y energía de fractura.

Autor	Densidad ρ (g/cm ³)	Compresión f_c (MPa)	Tracción f_t (MPa)	Mód. Elástico E (MPa)	Coef. Poisson ν -
González et al. (1997)_{ciment.}	2,31	11,28	1,50	6178	0,20
González et al. (1997)_{estruc.}	2,14	2,45	0,29	922	0,30
Aymat (2000)	2,00	1,50	0,30	-	-
Hall y Djerbib (2004)	2,09	0,75 - 1,46	-	-	-
Maniatidis y Walker (2008)	1,92	0,81	-	65	-
Bui y Morel (2009)	1,82 - 1,98	0,84 - 0,92	-	-	-
Ciancio y Augarde (2013)	1,86	15,00	0,80	-	-
Lombillo et al. (2014)	-	1,06 - 1,45	-	42 - 3171	-
Miccoli et al. (2014)	2,19	3,73	0,71	4143	0,27
Toufigh y Kianfar (2019)_{C5}	1,97	3,70	0,47	586	-
Shrestha et al. (2020)	2,08	0,56	0,11	67	0,15
Muzikova et al. (2018)	2,07	G_F 20,57 - 7,46	-	-	-

Tabla 2.1: Capacidad mecánica del tapial según los autores consultados

2.4. Justificación para la investigación

La revisión documental ha demostrado que la investigación sobre la capacidad mecánica, en régimen lineal, de los tapias presenta aún un largo recorrido. La principal conclusión que se puede obtener de una revisión de los datos que aportan las investigaciones realizadas hasta el momento es que existe una gran disparidad en los valores obtenidos, resultado a su vez de las distintas maneras de realizar los ensayos, tipos de materiales utilizados y técnicas de ejecución de los tapias. En cierto modo la disparidad de datos viene a poner de manifiesto

la gran diversidad de opciones que este material ofrece, ya que es posible encontrarse ante ejemplos de tapiales de una gran capacidad mecánica o de simples aglomeraciones de tierra con muy poca resistencia.

En cuando al comportamiento no-lineal del tapial se vuelve a constar que la investigación llevada a cabo hasta ahora es muy escasa. Los estudios realizados sobre estructuras de tapial y su comportamiento post pico demuestran que incorporando la mecánica de fractura a los modelos, los resultados obtenidos se vuelven más ajustados al comportamiento real (Bui *et al.*, 2011) (Ciancio y Augarde, 2013), si bien para su inclusión los autores asumen valores de energía de fractura provenientes de otros materiales, ya sea de forma directa o a través de relaciones matemáticas. Por tanto, podremos decir que sobre estructuras patrimoniales existentes, la capacidad de incorporar el estado real fisurado del tapial en un análisis mediante un modelo sintético se podrá realizar siempre y cuando se conozca el valor de energía de fractura del tapial. Este parámetro será el responsable de controlar el avance de las fisuraciones existentes, pudiendo por tanto mejorar notablemente la fiabilidad y precisión de los modelos estructurales, como ya se indica en Bui *et al.* (2011) y en Ciancio y Augarde (2013).

De forma general podemos indicar que las leyes de la mecánica de fractura han sido ya desarrolladas en otros materiales de construcción como el hormigón en masa, obteniendo resultados muy satisfactorios en cuanto al análisis y cálculo de su comportamiento (Planas y Elices, 1985), (Wittmann *et al.*, 1988). En el desarrollo de la tesis se demostrará que el comportamiento del tapial se puede asemejar a un material cuasi-frágil (con una analogía al hormigón en masa), con deformaciones post-pico no muy elevadas.

Tampoco son muy numerosos los trabajos específicos para obtener datos de energía de fractura a partir de probetas (Corbin y Augarde, 2014) (Hussaini y Toufigh, 2019), usando todos ellos cemento como material estabilizante y por tanto alejándose de los materiales tradicionales que aparecen en las estructuras patrimoniales.

A este respecto tenemos que señalar que prácticamente todos los autores consultados utilizan cemento al realizar sus probetas, (los citados anteriormente y los que aparecen en el siguiente capítulo), siendo por tanto muy pocos los que utilizan la cal como estabilizante (Gamrani *et al.*, 2012), (Martín-del Río *et al.*, 2019), utilizando otros autores diversos materiales para esta finalidad, como puzolanas o goma guar (Hussaini y Toufigh, 2019).

En el presente estudio se evitará el uso del cemento como estabilizante, no sólo por alejarse de las composiciones históricas, sino porque el uso de éstos como estabilizantes ha demostrado que provoca problemas de incompatibilidad molecular con las arcillas presentes en la tierra, producidos a nivel petrofísico por la alta microporosidad del cemento fraguado. También es habitual encontrar problemas por la posible presencia de distintos sulfatos en la fabricación del cemento, lo que provoca la aparición de sales solubles, alterando de esa manera el sistema cemento-tierra (Selwitz, 1995), (Cazalla *et al.*, 2000b).

Finalmente se ha podido constatar que tampoco son muy numerosos los estudios que utilicen técnicas no destructivas sobre estructuras de tapial, destacando quizás algunos estudios llevados a cabo por el CEDEX, realizados sobre la torre de Comares, (González *et al.*, 1997) y en la

Universidad de Cantabria (Lombillo *et al.*, 2014). El primero de ellos obtiene datos a partir de ensayos ejecutados directamente sobre la citada torre, mediante la técnica del gato plano, siendo esta técnica empleada también por Lombillo *et al.* (2014) sobre muros de tapial ejecutados ex profeso en laboratorio, muros a los que también les aplica la técnica del hole-drilling, si bien ambas técnicas pueden considerarse como ligeramente invasivas, ya que necesitar perforar o cortar pequeñas zonas del material para extraer datos. En el siguiente punto se ofrece una explicación más amplia de estos dos trabajos así como los resultados obtenidos.

En esta investigación de tesis se han aplicado también dos técnicas de ensayos no destructivos (END) sobre probetas, ya que no es posible actuar sobre estructuras reales. Por un lado las probetas se han sometido a ensayos de medida de Velocidad de propagación de Pulsos Ultrasónicos (UPV) y por otro se han obtenido datos mecánicos a partir de ensayos de Frecuencia-Resonancia (FFRF). El uso de UPV aparece en varios trabajos consultados sobre tapial, si bien el uso del cemento como aglomerante vuelve a aparecer en casi todas las dosificación de las probetas, como aparece en los trabajos realizados por Galán-Marín *et al.* (2013) y Canivell *et al.* (2018). Por otro lado, la aplicación de las técnicas FFRF al tapial no ha sido utilizada anteriormente por ningún autor (a fecha de redacción de esta tesis), siendo una técnica muy desarrollada otro tipo de materiales constructivos como hormigón, asfalto, mortero o piedra (Wenglas, 2008), (Schaeffer *et al.*, 2013).

El uso de END en condiciones de laboratorio, utilizados de forma específica sobre tapiales previamente controlados, nos dará las pautas para su posterior uso sobre estructuras reales. Así se podrán obtener datos mecánicos fiables de dichas estructuras reales, mediante la incorporación de los END .

Para terminar se puede indicar que el soporte normativo existente sobre materiales de tierra en general es muy escaso. Son muy pocos los países que han redactado normativas propias para materiales de tierra, por lo que la investigación en este campo se basa muy a menudo en equiparaciones con otros tipos de materiales (generalmente hormigón) en cuanto a su esquema de análisis. Dicha equiparación puede llegar a ser correcta en algunos puntos, aunque no en todos como se verá más adelante, ya que en síntesis ambos materiales son parecidos en cuanto a la forma en la que son compuestos. Ambos son una aglomeración de áridos en una matriz cementante, con la ayuda de agua para su amasado y un sistema de encofrados del cual adquieren su forma final.

2.5. Objetivos

El objetivo general de este trabajo de tesis es evaluar la viabilidad del uso de ensayos no destructivos sobre estructuras de tapial, como método de obtención de las propiedades mecánicas del mismo. A partir de los datos obtenidos, los métodos podrán extrapolables para obtener datos mecánicos sobre el tapial existente en estructuras reales patrimoniales que ayuden a evaluar de la manera más exacta posible su comportamiento ante determinadas sollicitaciones. Se pretenden encontrar además relaciones entre los datos de caracterización obtenidos mediante ensayos no destructivos y los obtenidos con técnicas destructivas habituales aplicados sobre probetas

que replican un tapial tradicional, además de proporcionar un bloque de datos extenso sobre un mismo material. Los ensayos en laboratorio aportarán una serie de pautas y datos que se podrán extrapolar a trabajos sobre estructuras patrimoniales, de manera que se puedan realizar estudios de capacidad o vulnerabilidad de las mismas a partir de los mínimos datos posibles y sin métodos lesivos para los edificios analizados.

Para poder alcanzar el objetivo general se deberán ir obteniendo resultados en objetivos parciales, ya que la investigación pretende obtener distintos datos mecánicos mediante el uso a su vez de distintas técnicas. Así, se irán obteniendo datos y resultados sobre la viabilidad del uso de END para la evaluación del Módulo de Elasticidad en el tapial, la densidad, la evaluación de la Resistencia a Compresión y para la obtención de la Energía de Fractura.



Figura 2.1: Estado actual de fisuración de la Torre de las Gallinas de la Alhambra. s.XIV

Con los datos obtenidos en esta tesis se podrán mejorar los análisis que se realizan sobre las estructuras de tapial patrimoniales, ya que se podrán incorporar valores mecánicos extraídos del propio edificio, y por tanto modelizar con más exactitud el estado actual de dichas estructuras. Con un modelo más realista se podrá dar una respuesta más ajustada a cuestiones tan complicadas como hasta dónde llegará una determinada fisura en el caso de la ocurrencia de un determinado terremoto. Hasta ahora se habían simulado situaciones de tensión estructural mediante el uso de FEM sobre estructuras, pero sin la incorporación datos reales o de energía de fractura.

Como aparece en las siguientes páginas todo el patrimonio construido con tapial del entorno de la ciudad de Granada, y el de otras zonas sísmicamente activas del planeta, está ya afectado por fisuraciones, provocadas en gran parte por anteriores terremotos. Por este motivo no es posible considerar estas edificaciones patrimoniales como estructuras sólidas, macizas o continuas, sino como lo que son, estructuras fracturadas, construidas con un material degradado por la acción sísmica y el tiempo.

La hipótesis a desarrollar durante el trabajo de investigación planteado se centra en la posibilidad de llegar a conocer los parámetros mecánicos lineales y no-lineales de un tapial histórico,

mediante métodos no destructivos aplicados in-situ y su posterior análisis. De esta manera se podrían aplicar estos sistemas y métodos sobre elementos estructurales reales y patrimoniales, para ajustar y mejorar los análisis de vulnerabilidad de los mismos.

El parámetro de comportamiento no-lineal que se persigue obtener es la energía de fractura G_F y, relacionado de forma directa con él, tensión máxima a tracción f_t , ya que son éstos dos parámetros los que controlarán el avance de las fisuraciones existentes ante un nuevo terremoto que afecte al monumento o estructura que se analice. Los datos obtenidos a partir de los procedimientos habituales aplicados sobre las probetas de tapial que se fabriquen, ejecutadas según técnicas tradicionales, deben quedar relacionados con los aportados por los métodos y ensayos no destructivos (END). Esta relación se convierte en fundamental, ya que al actuar sobre edificios patrimoniales no es posible obtener probetas de su material mediante la toma de muestras para realizar ensayos de caracterización.

Capítulo 3

Acercamiento al tapial

En este capítulo se realiza una breve introducción sobre el alcance tanto desde el punto de visto histórico como geográfico del tapial, para presentar una idea de la extensión de su uso y por tanto del posible alcance de la investigación realizada. Así mismo se redacta una breve reseña sobre la ejecución de este tipo de estructuras y las tipologías más habituales en el entorno de la ciudad de Granada.

3.1. Alcance del tapial desde una óptica histórica y humana

3.1.1. Alcance histórico

La construcción en tierra mediante la técnica del tapial está presente en la historia de la humanidad desde hace más de diez mil años. La revolución neolítica encontró en la tierra el material idóneo, abundante y económico, con el que formar sus nuevos asentamientos y ciudades, derivados éstos de la nueva economía de cultivos agrarios que estaba naciendo. La disponibilidad inmediata y cercana de este material, junto a su bajo coste y grandes prestaciones de resistencia, durabilidad y aislamiento frente a otros materiales disponibles, lo convirtió en uno de los primeros materiales en ser utilizados por las incipientes culturas humanas. Desde entonces y hasta la actualidad se ha seguido usando de forma casi continuada en un gran número de localizaciones y en construcciones tanto domésticas como monumentales (figura 3.1), alcanzando todas las zonas del planeta, tal y como se puede ver en la figura 3.2

Hasta bien entrado el siglo XIX el uso del tapial era habitual en muchas zonas urbanas y rurales, quedando desplazado por los nuevos materiales surgidos a finales de dicho siglo y durante el siglo XX, cayendo en el olvido además la tecnología que lo soportaba. Es a partir de la segunda mitad del siglo XX, con el inicio de los estudios de conservación del patrimonio, cuando comienza a mostrarse un nuevo interés por conocer realmente el material y su forma de uso. Además con la aparición de los movimientos ecologistas y la mayor concienciación de los

técnicos en los procesos edificatorios se vuelve a mirar al tapial como una solución global y de futuro a los problemas que la construcción plantea frente a la conservación del medioambiente y los ciclos de vida y huella de carbono de los materiales (Arrigoni *et al.*, 2017).

Si se estudia la etimología de la palabra *tapial* se encuentran diversos orígenes, si bien la mayoría de ellos alude a un origen hispano de la palabra. Serían los romanos los encargados de extender el uso de la técnica por su territorio, dando lugar a tipologías locales. En uno de los diccionarios etimológicos más extensos de la lengua castellana *Diccionario Crítico Etimológico Castellano e Hispánico* (Corominas y Pascual, 1954) encontramos el vocablo *Tapia* como “*vieja palabra común a los tres romances hispánicos y a la lengua de Oc, y propagada desde España al árabe y hasta el turco. Supone un hispano-latino 'tapia', de origen incierto, probablemente formado por 'tap', onomatopeya del apisonamiento*”

“...*el primer musulmán que habla de la tapia la describe como típicamente de España, es vocablo ajeno al árabe clásico y a los escritores y diccionarios puristas, y si en romance fuese de origen arábigo difícilmente podría explicarse la -p-*”. Algunos autores acercan su origen a la lengua catalana, así el sonido ‘*tabbia*’ sería préstamo del catalán, ya que con arreglo a la fonética dialectal de este idioma, *tapia* se pronuncia *tablia* en catalán occidental. (Olcese, 1993)

Al margen de la etimología de la propia palabra es claro que el origen de la técnica debió de producirse de forma independiente en muchos lugares del planeta. Haciendo una pequeña relación de las culturas que han utilizado el tapial en sus edificaciones se puede ver como aparece en la cultura Caldea, en la Egipticia, en las culturas Yangshao y Longshan de China (5.000 a 2.000 a. C.), en la cultura Romana (donde existen obras de argamasa apisonada dentro de encofrados desde el s. III a. C. y que denominaban *Opus formaceum*) (Ward-Perkins, 1994) o en las cultura prehispanicas de América.

De esta manera podemos encontrar ejemplos de esta técnica en lugares tan distantes entre sí como China (donde una importante parte de la Gran Muralla, construida entre los ss.V-XV, fue ejecutada con tapial), Irán (país en el que encontramos la milenaria ciudadela de Arg-é Bam, ss.VII-XI, (figura 3.1) que pasa por ser la mayor extensión de estructuras ejecutadas con tierra), España (cuyo ejemplo más bello y notorio encontramos en la Alhambra de Granada s.XII-XIV) o en Sudamérica con los yacimientos de Palo Blanco en Argentina datados en el s.I de nuestra era o la ciudad de Chan Chan en Perú de los ss.VII-VIII.

Si se centra el punto de interés en España, se puede encontrar una de las primera localizaciones de este material en el Valle del Ebro, en el poblado conocido como *Cerro de la Cruz*, datado en la Edad del Bronce tardío (s. XII a. C.) del cual se dice literalmente que: “*Las casa fueron construidas utilizando, casi exclusivamente, el tapial y el adobe puesto que el asentamiento se halla en una extensa llanura aluviona*” (Balil, 1973). Son también numerosos los restos de esta época que aparecen en el levante, entre los que se pueden citar los yacimientos de Orpesa La Vella, Guardamar del Segura, Burriana o Vall de Uxó.

Antonio García Bellido en su obra *La España del siglo I de nuestra Era* (García Bellido, 1947) pone en boca del historiador Plinio, en el libro XXXV, 169, lo siguiente: “*Por lo demás, ¿no hay en África e Hispania paredes de barro, a las que llaman 'de molde', porque se levantan,*

más que construyéndolas, vaciándolas entre dos tablas, las cuales paredes duran siglos por ser inmunes a la lluvia, al viento, al fuego, siendo más fuertes que cualquier cemento? En Hispania aún están a la vista las atalayas de Anibal y las torres de barro alzadas en lo alto de las montañas"([Olcese, 1993](#)).

En esta época es posible encontrar restos del uso de tapiales en estructuras romanas vinculadas con grandes edificaciones de uso público, como pueden ser los teatros de Segóbriga, Itálica o Acci (actual Guadix), o también las exedras existentes junto al foro de Clunia (al sur de la provincia de Burgos). En el ámbito de la edificación privada se encuentran restos de este material en las villas romanas de Ampurias o Vall de Uxó.

Durante la época medieval se edificarán las grandes estructuras de tapial que han llegado en mejores condiciones hasta la actualidad. Será uno de los personajes más importantes de la alta edad media, San Isidoro de Sevilla, quien en sus *Etimologías* nos hable de la necesidad de compactar la tierra para formar correctamente los tapiales ([Arízaga y Solorzano, 2010](#)). Las tradiciones anteriores a la llegada de los árabes serán mantenidas por éstos, mejorando las técnicas y dando lugar a algunas de las más importantes construcciones de tapial de la historia. Los ejemplos son muy numerosos, pudiendo encontrar el uso este material tanto en la ejecución de grandes murallas, complejos palaciegos, edificaciones destinadas al culto, construcciones de uso rural o viviendas de carácter modesto. Existe, como se verá más adelante, una importante heterogeneidad en los materiales y técnicas empleados en función del destino y época del edificio.

Es tal la extensión e importancia histórica de este material que la UNESCO tiene declarados 150 lugares como Patrimonio Mundial de la Humanidad en los que aparecen estructuras ejecutadas con tierra, abarcando los cinco continentes. Este número significa casi un 17 % del Patrimonio Cultural Mundial total.

Como ejemplos más notables de este patrimonio se pueden citar los restos de la ciudad de Cartago (Túnez), la ciudad de Tombuktú (Mali), la ciudad vieja de Sanaá (Yemen), los Tulou de Fujian (China), el Palacio de Potala en Lhasa (Tibet), las ciudades históricas de Hahoe y



Figura 3.1: Ciudadela de Arg-é Bam antes del terremoto de 2003. Fuente: wikipedia.org

Yangdong (Corea), el Templo de Horyuji (Japón), la Mezquita de Samarcanda (Uzbekistán), los restos de la cultura Chaco o de Mesa Verde (Estados Unidos) o los centros históricos de Cartagena de Indias (Colombia) o Valparaíso (Chile), entre otros muchos más, y por citar sólo ejemplos fuera del continente europeo.

En éste encontramos ejemplos como el centro histórico de la ciudad de Lyon, donde un gran número de edificaciones del barrio de Croix-Rousse está construido con tapial, la ciudad medieval de Provins, también en Francia, o los centros históricos de las ciudades portuguesas de Évora, Oporto y Guimaraes. La figura 3.2 muestra una aproximación a la extensión del uso del tapial en todo el planeta.



Figura 3.2: Alcance geográfico del tapial. Fuente: craterre.com (Sensi, 2003)

3.1.2. Alcance geográfico y demográfico

Si se gira el punto de vista desde el patrimonial al geográfico y demográfico, se puede indicar que hoy día se estima que alrededor del 40 % de la población mundial vive en edificaciones de estructuras ejecutadas con tierra (UNCHS, 2.009), localizándose la gran mayoría de estas viviendas en países en vías de desarrollo. Además, en muchos casos, están situados en zonas de alta sismicidad por lo que el riesgo de pérdidas de vidas humanas es muy alto. Como ejemplo se puede citar de nuevo la ciudad iraní de Arg-é Bam, cuya ciudadela fue arrasada el 23 de diciembre de 2003 por un terremoto de magnitud 6,6 Mw, con el resultado de 27.000 fallecidos, 30.000 heridos y más del 80 % de las estructuras colapsadas (Ghafory-Ashtiany y Hosseini, 2008) (Kázmér *et al.*, 2010). Otro ejemplo de gran vulnerabilidad sobre la población puede ser China, donde más de 100 millones de personas viven en casas construidas con muros de tierra (Shi, 2009).

Como se ha indicado en el punto anterior, el uso del tapial como material base de estructuras para viviendas sin valores patrimoniales no sólo se encuentra en los países de Oriente Medio, mediterráneos o sudamericanos. Esta tecnología se puede encontrar también en otros muchos países, algunos ya citados como China, pero también en otros como Estados Unidos, Japón,

Nueva Zelanda, Italia, Inglaterra, Alemania o Francia, donde se estima que aún existían sobre 2,4 millones de viviendas construidas tierra en 1.987 (Michel y Poudru, 1987).

Es además en Francia donde aparece en 1791 uno de los tratados más completos sobre la ejecución de estructuras de tapial con el trabajo de Cointeraux para edificaciones rurales (Cointeraux, 1791). Quizás fruto de estos tratados sean los numerosos edificios construidos con esta técnica en la ciudad de Lyon, donde aún permanecen más de 100 inmuebles construidos en tapial (Pisé en la denominación en francés) ejecutados durante los últimos dos siglos. (Alex et al., 2012)

Son conocidos también los edificios construidos en Alemania en 1795 a petición del servicio de bomberos de Meldorf, (como estructuras resistentes al fuego) o la Haus Rath en Weilburg an der Lahn, (figura 3.3) de seis plantas de altura, construida en 1836 por Jacob Wimpf (Guntzel, 1990).



Figura 3.3: Edificio de viviendas en Weilburg an der Lahn (Alemania). Fuente: doatrip.de

Durante la primera mitad del siglo XX arquitectos tan famosos como Frank Lloyd Wright o Le Corbusier se interesaron por la tierra como material de construcción. Así, el americano diseñó varias viviendas de muros de tierra, como la casa Hollyhock, la casa Ennis-Brown o la casa Burlingham, si bien esta última no se llegó a construir.

Por su parte Le Corbusier comenzó a diseñar edificaciones en tierra destinadas a solucionar los problemas migratorios ocasionados por la Segunda Guerra Mundial, escribiendo un pequeño libro titulado *Les Constructions Murondins*, describiendo variadas soluciones para edificaciones de carácter residencial y de servicios.

En la actualidad existe un renovado interés por este material y prueba de ello son las numerosas experiencias constructivas que se están llevando a cabo por todo el mundo (Bestraten Cas-

tells *et al.*, 2011). Sin entrar en gran detalle sobre este aspecto se pueden citar como algunos de los edificios más llamativos el Eden Project en Cornualles (Reino Unido), el Contemplative Center de la Universidad de Stanford (Estados Unidos), la Escuela de Artes Plásticas de la Universidad de Oaxaca (Méjico), el Centro Nk'Mip Desert en Osoyoos (Canadá) o el Centro Deportivo y Piscina de Toro (figura 3.4), así como numerosas viviendas ejecutadas por todo el mundo.



(a) Piscina en Toro. Fuente: VIERarquitectos



(b) Eden Project en Cornualles. Fuente: edenproject



(c) Universidad de Oaxaca. Fuente: tectonicablog

Figura 3.4: Ejemplos de edificación contemporánea con tapial

3.2. Breve explicación de la ejecución de un tapial

Se describe a continuación, de forma resumida, el método que se seguía para proceder a la ejecución de los muros de tapial, y que aún hoy día se sigue utilizando. De forma general hay que decir que el comportamiento mecánico de los tapiales va a depender de forma fundamental de tres aspectos a controlar durante su ejecución: la dosificación y composición de la mezcla, el grado de humedad y el método o intensidad ejercida durante la compactación en relación a la densidad final. (Mu y Zhou, 2012)

Materiales

En primer lugar se tratarán los aspectos relativos a clasificación de los materiales a emplear y sus dosificaciones. De forma básica los materiales constitutivos de los tapiales históricos son: tierra (preferentemente arcillosa), árido de distintas granulometrías y un estabilizante (básicamente cal). La relación entre estos materiales y su calidad depende fundamentalmente del tipo de estructura que se pretende ejecutar con ellos y el periodo histórico en el que se realicen. De hecho la forma de utilizar la cal en los tapiales proporciona una valiosa información del momento de su construcción. Así podemos encontrar soluciones de cal incorporada a la masa en mayor o menor cantidad, cal colocada de forma exclusiva como elemento de protección del tapial (en forma de costra en los denominados tapiales calicostrados) o simplemente su ausencia en los periodos de crisis económica o construcciones de escasa importancia. (Ontiveros *et al.*, 2008) (Civantos, 2002)

La mezcla puede llevar incorporada otros tipos de materiales que le confieren distintas capacidades. Se pueden encontrar restos de cerámica (que confieren cierta hidraulicidad a la mezcla), fibras vegetales o crines de caballo (para aumentar su capacidad mecánica ante esfuerzos de tracción) o incluso sangre de animales u otras sustancias orgánicas para mejorar el comportamiento de los aglomerantes (Gamrani *et al.*, 2012) (Kraus *et al.*, 2014).

Juan de Villanueva da algunas características del material con el que se deben construir los tapiales en su obra *Arte de Albañilería* de 1827, en el que literalmente indica “*La tierra que debe emplearse para construir tapias ó paredes debe ser arcillosa, pegajosa, compacta limpia de guijo, y con poca mezcla de arena y cascajo.*”...“*se pueden construir con ella paredes muy fuertes y durables. El uso de fabricar con sola tierra es antiquísimo en España.*” (Villanueva, 1827)

A continuación se transcriben también las indicaciones de hace Jose Antonio Rebolledo en su manual de construcción editado en 1875: “*Como ejemplo podemos indicar lo que aparece en la tierra franca con alguna arena, la vegetal y en general toda tierra más ó menos arcillosa que después de humedecida se la oprime en la mano y conserva la forma así adquirida, es á propósito para formar tapias. La tierra empleada en esta fábrica se la prepara limpiándola de los cantos que pueda contener, mayores que una nuez, y pisándola fuertemente hasta que forme pasta de alguna consistencia, para lo cual, si fuera necesario, se la humedece algo. Afín*

de evitar los agrietamientos que al secarse pudieran aparecer, se mezcla á la pasta, durante el amasado paja ó heno cortado distribuido por igual en toda la masa. Preparada de este modo la pasta y establecido un encajonado,(...) se van formando las diversas tongadas que constituyen esta fábrica, la cual, aunque ménos resistente que otras, se distingue por su carácter de economía. En los países cálidos y secos como el nuestro es de muy útil empleo y sirve para levantar construcciones que llegan á durar largos años." (Rebolledo, 1875)

Ejecución

De forma previa a la construcción de los muros de tapial, se ejecutaba la cimentación que, como regla general de todas las estructuras de tierra, se construye con materiales resistentes a la acción de la humedad, resistencia que la naturaleza del propio material de la estructura de tierra no es capaz de aportar.

Para ello se crean zanjas corridas de cimentación a base de fábricas de mampostería de piedra con morteros de cal y arena, y con un ancho de 10 cm superior al del muro de tapial por ambas caras. El espesor o profundidad será variable en función de las condiciones del terreno en que se ejecute la estructura, si bien suele oscilar entre los 70 y los 100 cm. Sobre estas zanjas de cimentación se ejecuta un pequeño zócalo, o sobrecimiento, del mismo material pétreo de la cimentación, pero ya del espesor del muro de tapial y de unos 20 a 30 cm de altura.

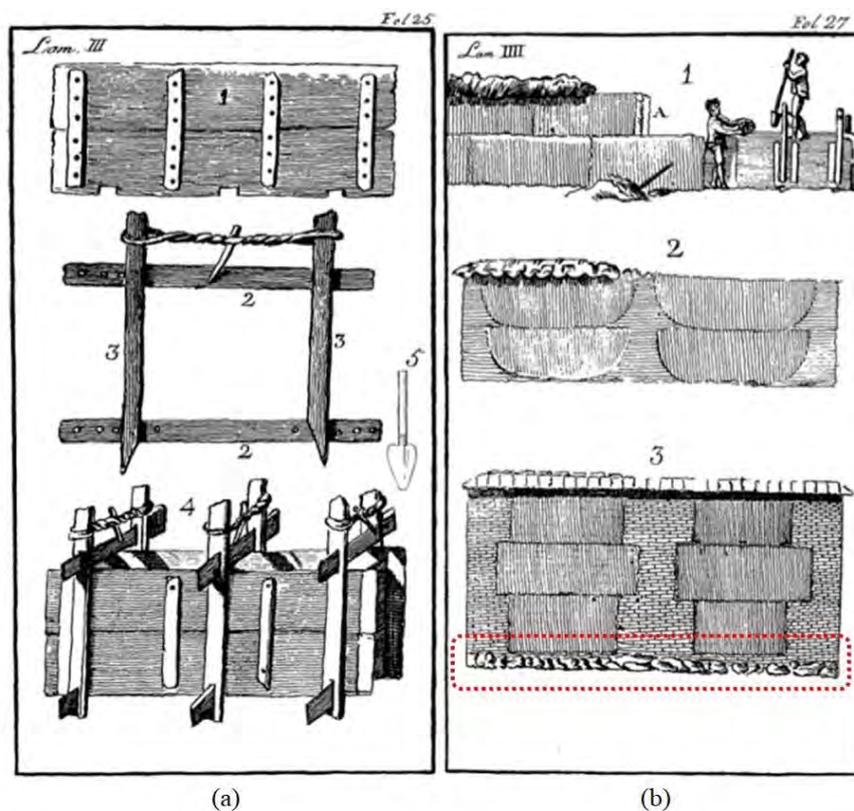


Figura 3.5: Materiales y ejecución del tapial según Juan de Villanueva (Villanueva, 1827)

La misión de este zócalo es alejar el tapial del terreno, evitando los problemas que la humedad de capilaridad del suelo y el salpiqueo de la lluvia puede producir sobre el muro. Puede verse representado en la parte baja del alzado señalado con el número 3 en la figura 3.5.b.

Una vez ejecutado el muro de arranque se comienza por colocar los costales del encofrado (llamados también tapiales, tableros, puertas o tapiaderas) que serán sujetados entre sí de forma paralela y a la propia fábrica de tapial mediante pasadores de madera llamados agujas (figura 3.5.a). El tamaño de estos encofrados solía ser de unos dos metros de longitud y unos ochenta centímetros de altura para que durante las labores de apisonado no chocaran los codos del operario con los encofrados, y a la vez fueran fácilmente manejables. (Villanueva, 1827), (Espinosa, 1859).

Respecto de las agujas (marcadas con el número 2 en la figura 3.5.a) se puede indicar que se podrían utilizar de madera o de hierro, quedando habitualmente separadas unos cincuenta centímetros entre sí. Cuando el espesor del muro era pequeño, estas agujas conectaban ambas caras del encofrado y se podían recuperar, pero en fábricas de gran espesor (como podían ser las murallas), el sistema obligaba a que las agujas estuvieran clavadas al muro de tapial inferior ya ejecutado, por lo que no era posible su recuperación. La sucesión de huecos (denominados mechinales) dejados por las agujas en los muros de tapial es lo que crea esa particular impronta rítmica tan característica de este tipo de estructuras.



Figura 3.6: Mechinales en alzado de muro de tapial. Muralla Zirí de Granada. s.XII

La sujeción en vertical entre las agujas y los tableros de los tapias se ejecutaba mediante unas piezas llamadas costales. Éstas se colocaban en vertical, quedando sujetas por su parte inferior mediante un acople en las agujas y por la parte superior mediante una cuerda o con la siguiente línea de agujas que servirán al cuerpo superior del muro. Aparecen representadas con el número 3 en la figura 3.5.a, quedando un conjunto aguja-costal denominado como cárcel o aro (Villanueva, 1827) o también como capilla (Balbuena, 1922).

En muchas ocasiones se colocaba en el interior unas piezas denominadas codales, cuya misión era la de mantener constante el espesor del muro, sirviendo a la vez de escantillón y de

puntal para evitar el cierre hacia el interior de los tableros. Estas piezas se pueden ir eliminando a medida que el cajón se va llenando de tierra.

Sobre este encofrado se va vertiendo la mezcla de tierra hasta alcanzar unos 10 cm de espesor, siendo apisonada posteriormente mediante la acción dinámica de pisones manuales hasta conseguir una tongada compactada de unos 5 a 6 cm de espesor. El peso aproximado de los pisones está entre los 8 y 12 kg, siendo habitualmente de madera con forma trapezoidal. El orden de los golpeteos de la compactación debía empezar por el perímetro y avanzar rítmicamente hacia el interior del espesor del muro. Lo más habitual era que se necesitara el trabajo de cinco operarios por cajón, dos apisonadores, un amasador y dos peones. En la figura 3.7 aparece una representación de dicho reparto de operarios.

Existen dos citas que describen de forma muy acertada el trabajo indicado. La primera, de Juan de Villanueva, dice: "...pisa, aprieta y maciza la tierra con un pisón algo pesado, que tiene su plano inferior puntiagudo...El pisón y los pies del trabajador van macizando la tongada...". La segunda es de Fernández Balbuena: "...La tapiería de calidad quiere ir muy pisada, y para esto es preciso cuidar de los tapiadores que no se emboben, que para ser buen tapiador hay que tener brazos duros y mucho empuje" (López, 1999)

Se debe mantener un nivel adecuado de humedad en la tierra, regando ligeramente el material sin que llegue a formarse barro. El control de la humedad en la masa es un factor fundamental ya que una cantidad excesivamente baja de contenido en agua puede crear zonas con distinto nivel de compactación mientras que valores elevados llevarán a tener un material poroso, afectando por tanto de forma directa a su densidad. (Hall y Djerbib, 2004)

Una vez relleno y compactado todo el cajón del tapial se procede al desmontado de los tableros del encofrado para recolocarlos en la siguiente posición e ir de este modo avanzando en la ejecución completa del muro (figura 3.8). En el caso de necesitar detener la ejecución se creaba una junta de trabajo mediante la ejecución ataluzada (en torno a los 45°) de la cara que quedaría en contacto con el siguiente tramo de muro, a realizar una vez que se retomaran los trabajos.

En muchos tratados se insiste en la necesidad de dotar al tapial de un declive de 7 a 8 milímetros por metro de altura, aproximando las dos tablas por arriba con auxilio de la cuerda arrollada que une los dos montantes verticales. Los agujeros que deja en la pared la aguja, travesano o traba, denominados mechinales, se rellena con tierra apretada con un barrote (Nacente, 1890). De esta manera se llega a ejecutar un cajón o cuerda de tapial, que puede tener entre 80 y 100 cm de altura por unos 200 cm de longitud. Todas las dimensiones están siempre en función

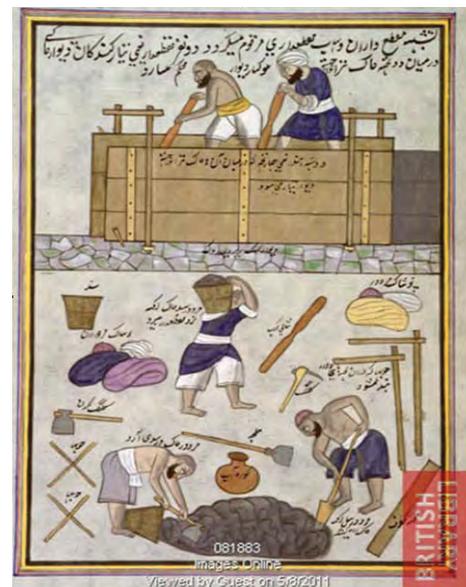


Figura 3.7: Representación de la ejecución de un tapial. Fuente: British Museum

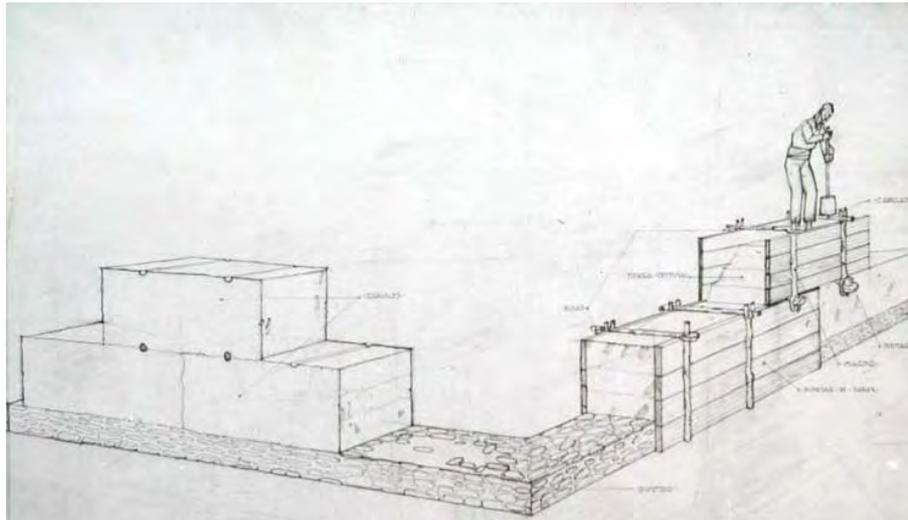


Figura 3.8: Ejecución del tapial según Fernández Balbuena (Balbuena, 1922)

de medidas antropométricas y de la capacidad de los operarios que intervienen en el proceso. Hay que señalar también que este sistema no necesita de andamios para su ejecución ya que los operarios pueden usar directamente los muros como apoyos y la cara exterior no necesita un tratamiento posterior, lo que repercute, aún más, en su economía constructiva. Si serían necesarios medios auxiliares para la elevación de material desde la base hasta el plano de trabajo.

3.3. Tipologías de los tapiales

A continuación se describen brevemente y de manera concisa las tipologías más habituales de tapial en el ámbito geográfico cercano. No es la intención de este estudio realizar un catálogo de formas o sistemas constructivos, ya que cada área cultural y cada periodo ha creado variantes materiales y formales. Realizar dicho catálogo sería un estudio muy extenso que compete a otra rama del conocimiento. La clasificación se realiza en función del tipo y dosificación de los materiales empleados en su ejecución, así como de la técnica o disposición de dichos materiales dentro del cajón de encofrado (Ontiveros *et al.*, 2008) (López, 1999) (Civantos, 2002).

Tapial de tierra

Este tipo de tapiales se reconoce por tener una mezcla formada casi de forma única por tierra y cal, con diferentes dosificaciones, si bien la presencia de la cal puede llegar a ser nula en algunas construcciones más modestas. La relación entre ellos estará por tanto ligada a la función a la que se destine la estructura y a la economía del momento de su ejecución. Las dosificaciones más ricas en cal reciben en algunos lugares el nombre de *hormigón de cal*. El material es homogéneo dentro del encofrado, pudiendo observarse una capa más fina y suave en el exterior de los cajones, efecto del traslado de los finos de arcilla y cal que se produce durante



Figura 3.9: Tapial hormigonado. Muralla de la Alhambra. s.XIV

la acción mecánica del apisonado.

Tapial hormigonado

En este tipo aparecen granulometrías más amplias, con presencia de áridos de mayor tamaño y dureza. La mezcla se enriquece con la presencia de cal, formando al igual que el anterior una masa homogénea sin distinciones en todo su espesor. La capacidad mecánica de este tipo de tapias es muy alta, en función de la cantidad y tipo de cal utilizada como aglomerante, así como del tamaño de los áridos usados en el interior (figura 3.9).

Tapial de cal y cantos

Este tipo se caracteriza por la presencia de bolos o piedras de gran tamaño en el interior de la masa. Entre ellas aparece un mortero de cal, de nuevo con dosificaciones variables. Su uso principal aparece en elementos masivos, necesitados de una gran capacidad mecánica y de resistencia (figura 3.10).

Estos tres tipos de tapias estarían dentro del grupo de tapias denominados como *simples*, en los que toda la mezcla colocada dentro del encofrado es homogénea. Los restantes tipos



Figura 3.10: Tapial de cal y cantos. Puerta de San Cecilio. (Granada) s.XIII

presentan innovaciones técnicas que buscan mejorar esencialmente su durabilidad, a la vez que economizar su ejecución.

Tapial calicostrado

Este tipo, más evolucionado en el tiempo, presenta como principal característica la del uso de la cal, (o mortero de cal), de forma más selectiva. Así, mientras en el interior del muro se presenta una masa uniforme de tierra con grava, la cal se reserva para formar el recubrimiento exterior (costra). Se puede citar el trabajo de [Gómez-Moreno Martínez \(1966\)](#) sobre la Granada del siglo XIII en el que literalmente indicaba lo siguiente al hablar sobre la torre de la Vela *"El cascarón de la torre está hecho con tapias de grava, arena, arcilla ferruginosa y cal, esta última cargada hacia la superficie exterior para darle firmeza, y lo demás procedente del suelo mismo del cerro, que es aluvión moderno con bancos arcillosos"*, incidiendo nuevamente en una de las características generales de este material, el uso directamente del terreno del lugar. Al igual que el resto de tapias, el muro calicostrado se va creando a partir de la adición de sucesivas tongadas, pero existe una segregación en la colocación de la cal en los bordes de la tongada, quedando en contacto con los tableros del encofrado.

La disposición en el exterior de las tongadas y el apisonado de ambos materiales a la vez hace que el mortero exterior de cal y el interior de tierra queden perfectamente ligados, anclados, vinculando el uso de la cal casi de forma exclusiva a sus funciones protectoras del interior del muro. Esa ligazón no impide que, como se aprecia en la figura 3.11, la costra exterior, de color más claro debido a la alta presencia de cal, pueda separarse de la masa interior. Esa patología provoca que el material interior quede al descubierto y por tanto expuesto a los agentes atmosféricos, acelerando la degradación de la estructura.

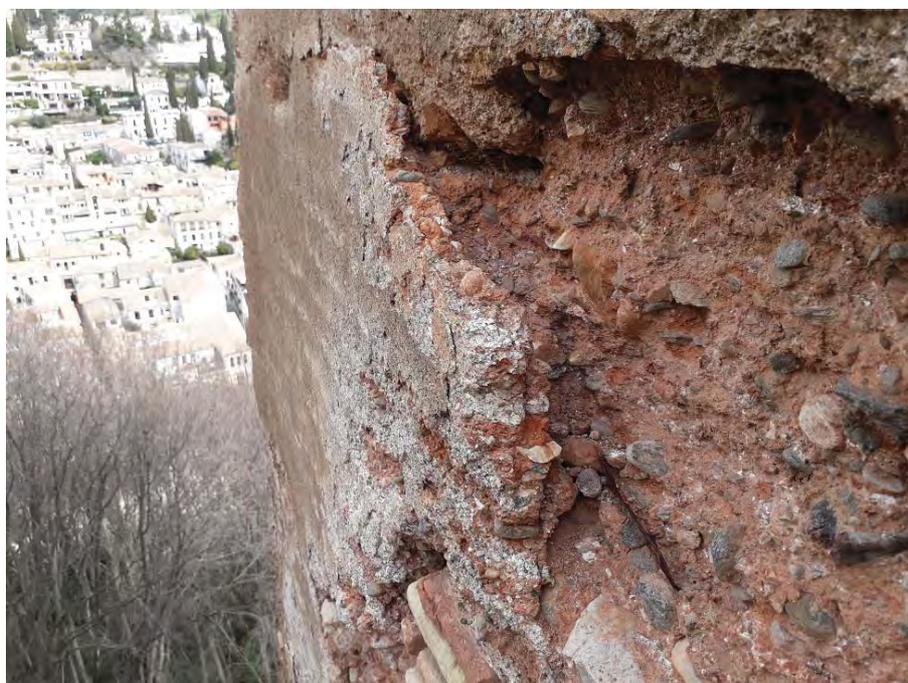


Figura 3.11: Tapial calicostrado. Torre de las Gallinas (Alhambra) s.XIV

Tapia con verdugadas

Estas fábricas se ejecutan al estilo del *opus mixtum* romano, utilizando el tapial como relleno de los cajones que se crean entre los machones y las verdugadas de ladrillo. Los mechinales de las agujas quedan siempre en el espesor de las verdugadas de ladrillo, generalmente formadas por tres hiladas. De esa manera la primera hilada sería el remate del cajón inferior, la hilada central albergaría los mechinales para las agujas y la hilada superior serviría de base al siguiente cajón de tapial.

Entre el cajón y la primera hilada de ladrillo de la verdugada aparece siempre una capa de mortero de regularización que absorbe las imperfecciones superiores del tapial. En la figura 3.12 se aprecia el cambio de color entre el cajón de tapial y el mortero de regularización (más claro al contener más cal) antes de la primera hilada de ladrillo. También se observa el hueco para alojar la aguja. Los tapias utilizados en los cajones entre ladrillos pueden a su vez ser de cualquiera de los tipos indicados anteriormente.



(a) Aspecto de un tapial con verdugadas de ladrillo



(b) Detalle del remate de mortero de cal previo a la primera hilada de ladrillo de la verdugada

Figura 3.12: Tapial con verdugadas de ladrillo. Hospital de San Juan de Dios. (Granada) s.XVI

Tapia real

Esta modalidad se ejecuta colocando de forma alterna tongadas de mortero de cal y de tierra compactada, con espesores relativos variables en función del uso al que se destine.

Tapia mixta

Esta tipología introduce directamente otros materiales (piedra o ladrillo) en el espesor del muro, quedando una secuencia de tongadas de tierra y ladrillo colocadas de manera alterna. Los ladrillos se colocan a tizón para aumentar su traba con la fábrica, si bien no llegan en muchos casos a cubrir todo el espesor del muro (figura 3.13).



Figura 3.13: Tapia mixta.

Tapia con juntas reforzadas

Los cajones de tapial presentan un punto débil en el encuentro entre ellos, tanto en vertical como en horizontal, ya que no existe traba entre los planos de éstos. En elementos defensivos se solían tratar esas juntas con un mortero muy rico en cal, que reducía la posibilidad de entrada de agua en esas líneas de contacto, produciendo a la vez una imagen cercana a una fábrica de sillares (figura 3.14).



Figura 3.14: Tapia con juntas reforzadas. Muralla de Cáceres s.XII.

Existen otras series de tipologías locales, muchas de ellas provenientes de la mezcla de las aquí indicadas, sin que sea objeto de este trabajo su descripción. Para un estudio más profundo se pueden consultar los trabajos realizados por el proyecto PREFORTI en la Universidad de Granada, que aporta un gran catálogo de ejemplos de tapial utilizado en estructuras defensivas en el sureste español ([Molina Gaitán et al., 2020](#)), o el realizado por la Universidad de Valencia a través de Restapia ([Mileto y Vegas, 2014](#)).

Capítulo 4

Metodología y materiales

En este capítulo se detalla el proceso de fabricación de las probetas de tapial, que serán posteriormente utilizadas en los ensayos de caracterización. Como ya se ha indicado previamente la intención es reproducir de la manera más fidedigna posible un tapial hormigonado tradicional, al estilo de los ejecutados en muchas construcciones históricas del entorno. Para poder lograrlo se deben tener en cuenta varios aspectos fundamentales, que se desarrollaran a lo largo de este capítulo.

Estos aspectos son:

- Elección y clasificación de los materiales a emplear.
- Dosificación de la mezcla del tapial.
- Fabricación de los encofrados de tapial.
- Ejecución de las probetas.

4.1. Metodología empleada en la investigación

De forma resumida, la metodología seguida para la investigación aparece en la figura 4.1, donde se recogen los siguientes puntos:

A continuación se relacionan los trabajos realizados, en dos bloques distintos, quedando incluidos en el primero de ellos el trabajo de recopilación de datos y ejecución de las probetas, mientras que en el segundo se relacionan los ensayos realizados sobre dichas probetas y el estudio y análisis posterior de los resultados obtenidos. El segundo de los bloques no está organizado de forma temporal a la ejecución de los ensayos, para una mejor comprensión de los datos que se han ido obteniendo.

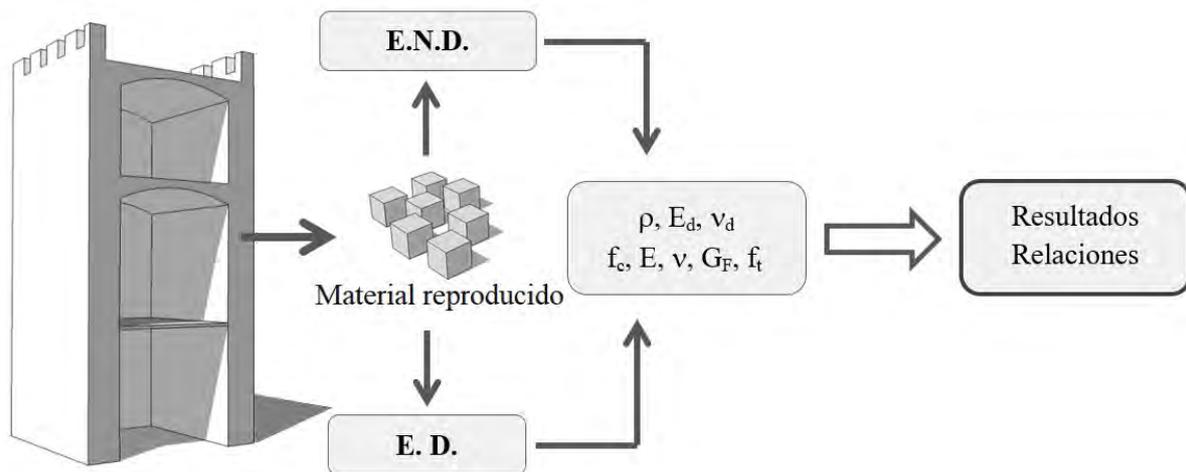


Figura 4.1: Diagrama del trabajo realizado en la tesis

■ Recopilación de datos y ejecución de probetas.

1. **Revisión documental.** El primero de los pasos ha sido realizar una revisión completa y constante de la documentación publicada, tanto previa al inicio de este estudio como durante la realización del mismo. De estos estudios se han extraído algunos de los datos de partida, así como la forma de afrontar la realización de ensayos, en particular de los END.
2. **Selección de dosificaciones.** Se han seleccionado las dosificaciones y los materiales a utilizar, en función de los datos obtenidos de los trabajos realizados por *De la Torre (1994)*, *Martínez y González (2005)*, *Ontiveros et al. (2008)* y *Alejandro y Martín del Río (2012)*, sobre la Alhambra los dos primeros, sobre las murallas de la ciudad de Granada el tercero y sobre las murallas de San Juan de Aznalfarache el último de ellos. A partir de la revisión de los datos aportados por los autores indicados, se utilizan dos dosificaciones tierra:cal en el estudio, ajustadas a relaciones 3:1 y 4:1.
3. **Ejecución de probetas cúbicas de 100.100.100 mm.** Para la realización de los ensayos posteriores se han fabricado 11 series de probetas cúbicas, de 100 mm de lado, con las dos dosificaciones indicadas (3:1 y 4:1) y con distintas cantidades de agua en su amasado. Cada serie está compuesta por 4 probetas, de manera que se ha podido iniciar el estudio sobre un total de 44 probetas cúbicas.
4. **Ejecución de probetas prismáticas de 440.100.100 mm.** De forma paralela al punto anterior se han fabricado 12 probetas prismáticas con una longitud de 440 mm y una sección de 100 x 100 mm. La mitad de las probetas se han ejecutado con una dosificación 3:1, quedando la otra mitad con una dosificación 4:1. En todas ellas el contenido en agua se ha mantenido estable, para no introducir más variables en el estudio.

En la figura 4.2 aparece de forma resumida el tipo y número de probetas utilizadas en cada ensayo realizado. A partir de las probetas prismáticas, y una vez realizados los ensayos sobre ellas, se han ido obteniendo el resto de sub-probetas a partir del corte de las anteriores.

■ Ejecución de ensayos y análisis de resultados.

1. **Ensayos destructivos (ED) a compresión sobre probetas y sub-probetas cúbicas de 100.100.100 mm.** Todas las probetas cúbicas, tanto las fabricadas en ese tamaño desde el inicio (44 unidades) como las sub-probetas cúbicas ssP provenientes de los sucesivos cortes sobre las probetas prismáticas (27 unidades), se han llevado a una prensa de carga, donde se han obtenido valores de carga máxima a compresión, módulo de elasticidad secante y coeficiente de poisson. También se han tomado datos en esta fase de los frentes de carbonatación, convirtiéndose este en uno de los aspectos claves en la interpretación de los datos aportados por los ensayos.
2. **Ensayos de Fractura sobre probetas prismáticas.** Las doce probetas prismáticas se han sometido a un ensayo destructivo para obtener los valores de energía de fractura y tensión máxima a tracción, así como las leyes de ablandamiento de cada una de ellas. El ensayo de fractura divide las probetas prismáticas originales de 440.100.100 mm en dos partes o sub-probetas sP de aproximadamente 220.100.100 mm, que serán utilizados posteriormente.
3. **Ensayos No Destructivos (END). Medida de UPV.** Todas las probetas han sido objeto también de ensayos no destructivos de velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos, durante un periodo de 30 días a partir de su ejecución. Este ensayo, junto con los datos recabados del control de peso y humedad, permite obtener datos de correspondencia entre densidad y UPV, logrando una primera relación de caracterización del material.
4. **END. Ensayos FFRF sobre probetas cúbicas y prismáticas.** Seis series de probetas cúbicas y las doce probetas prismáticas han sido ensayadas mediante la técnica de FFRF, obteniendo datos de módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson dinámicos. Estos datos se comparan con los obtenidos mediante UPV y con las técnicas destructivas habituales.
5. **END. Ensayos FFRF sobre sub-probetas prismáticas sP de 205.100.100 mm.** Una vez terminado el ensayo de fractura, los dos segmentos resultantes del ensayo (de unas dimensiones aproximadas de 220.100.100 mm) se tallan mediante una máquina de corte de diamante en dos sub-probetas (sP) de 205.100.100 mm, obteniendo 15 unidades lo suficientemente estables para seguir siendo utilizadas, volviendo a ser sometidas a ensayos FFRF.
6. **END. Ensayos FFRF sobre sub-probetas cúbicas ssP de 100.100.100 mm.** Una vez obtenidos los datos de los ensayos indicados en el punto anterior las sub-probetas sP 205.100.100 mm se vuelven a cortar, obteniendo así sub-probetas cúbicas (ssP) de 100 mm de lado, provenientes de las probetas prismáticas originales. Al igual que en el caso anterior algunas piezas se deterioraron durante su manipulación, por lo que finalmente se obtienen solamente 27 sub-probetas cúbicas ssP. Sobre éstas se obtienen nuevamente datos mecánicos mediante la técnica FFRF.
7. **Estudio de la carbonatación.** Todas las probetas se han mantenido en un ambiente de laboratorio durante un periodo de tiempo superior a los 300 días, llegando en algunos casos a superar los 400 días. Este prolongado proceso de curado ha tenido la intención de poder medir el avance y efecto de la carbonatación dentro de las probetas, sin actuar mediante procesos de acelerado del mismo a través del uso de

cámaras de envejecimiento. La cuantificación de la carbonatación se considera uno de los puntos claves del estudio, ya que la cal utilizada como estabilizante, en forma de hidróxido cálcico, habrá ido incorporando a lo largo del tiempo de envejecimiento el dióxido de carbono del aire para volver a ser el carbonato cálcico original, modificando por tanto la características mecánicas de la probeta en función de la cantidad de carbonato cálcico presente. Este proceso se inicia con la fabricación de las probetas y no concluye hasta su rotura final.

8. **Control de la variación de peso y humedad.** Se ha controlado la pérdida de humedad de las probetas mediante la variación de su peso, tanto en las probetas cúbicas como en las prismáticas. El control de este parámetro permite conocer el momento en el que las probetas alcanzan su equilibrio de humedad, en un ambiente de laboratorio.
9. **Estudio y análisis de los resultados obtenidos.** Con todos los resultados obtenidos se han podido elaborar relaciones estables entre los ensayos no destructivos y los destructivos, para una caracterización previa del material real sin necesidad de actuar mediante extracción de muestras.

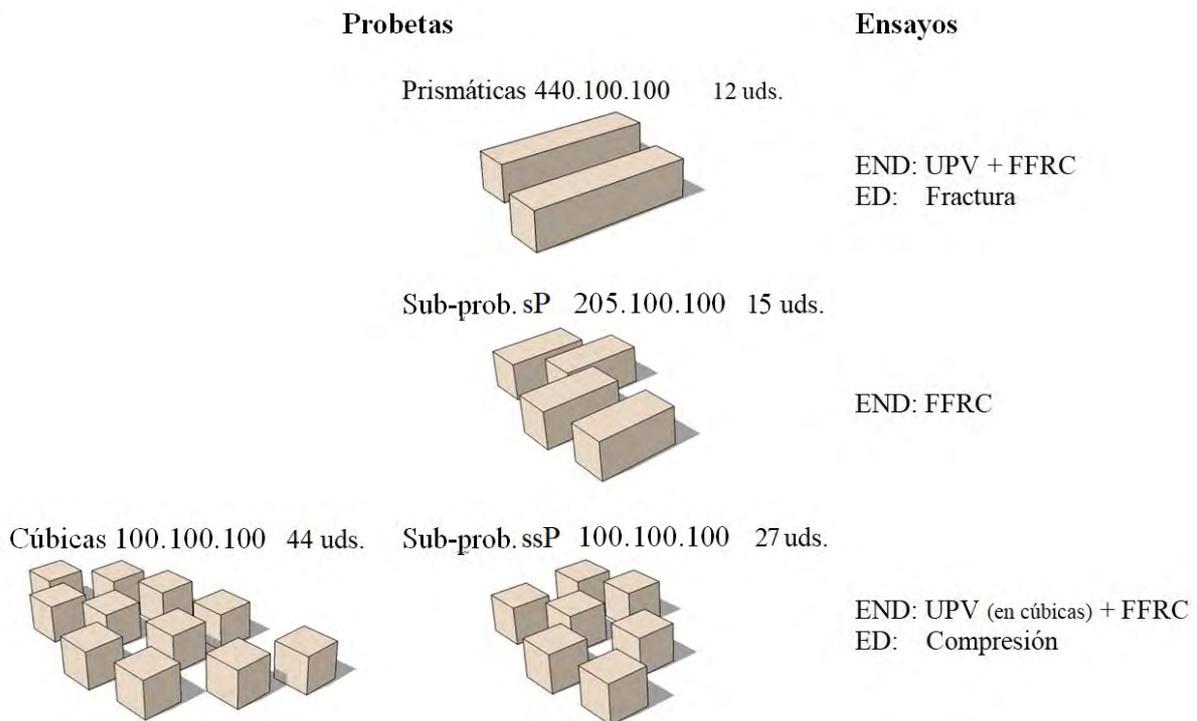


Figura 4.2: Tipos de probetas utilizadas y ensayos realizados sobre cada tipología

4.2. Elección y clasificación de los materiales a emplear.

El material base para la fabricación de las probetas de tapial es la tierra. La elección de la misma se ha realizado en base a los criterios tradicionales que se utilizaban para la selección del

material, si bien posteriormente se analiza su composición mediante un análisis granulométrico y de contenido en sales y materia orgánica. El segundo de los materiales utilizados es la cal, que tendrá la misión de estabilizar la tierra de las probetas, confiriéndole una parte importante de sus capacidades mecánicas.

A continuación se exponen la características de cada uno de estos dos materiales.

4.2.1. La tierra

Tradicionalmente la elección de la tierra se realizaba mediante técnicas organolépticas por constructores expertos. Así, éstos eran capaces de identificar la aptitud de una determinada tierra por su color, su textura, su olor después de la lluvia, su sabor, por la forma de deshacerse en la mano, por la forma de romperse caer al suelo o por la mancha que dejaba en la piel al manipularla (Bauluz del Río y Bárcena, 1992). Para este trabajo de tesis se ha seleccionado una tierra proveniente de la llamada *Cantera de los Cañones* en el municipio de Ízbor (Granada). En la elección del material intervienen tanto cuestiones de índole técnico como económico. El material es transportado en sacas hasta el Laboratorio de Estructuras de Edificación (LEE) de la ETSIE de la Universidad de Granada, donde serán fabricadas todas las probetas y se realizarán los ensayos de granulometría.

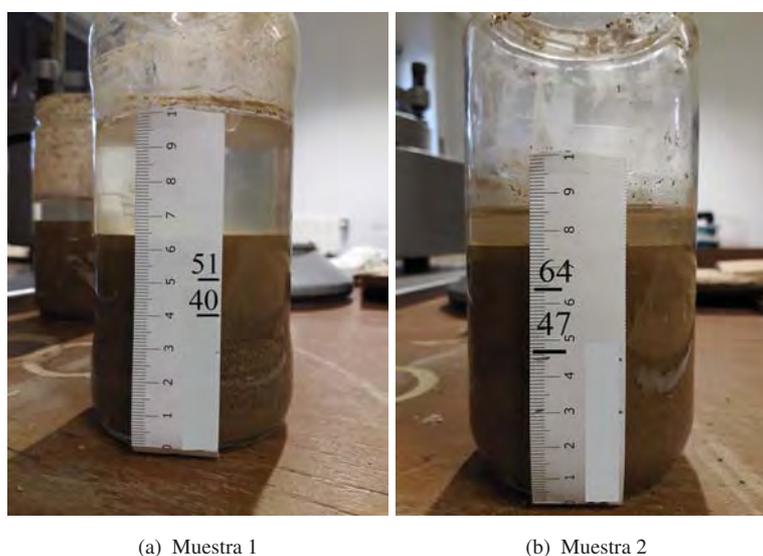


Figura 4.3: Ensayos de obtención de granulometría por sedimentación

Una interesante relación de pruebas visuales y manuales aparecen en la citada monografía de Bauluz del Río y Bárcena (1992). De entre las indicadas se realiza en el laboratorio una prueba de sedimentación, para obtener una idea aproximada de la composición del suelo. Así, se vierte en un bote de cristal una muestra del suelo seleccionado, hasta 1/3 de su altura, para posteriormente cubrir con agua hasta llegar a los 2/3. Se agita y se deja reposar para que la velocidad de sedimentación ordene las distintas granulometrías. Finalmente se miden los espesores relativos de cada una de las capas para conocer su granulometría completa.

Se han realizado dos pruebas sobre dos muestras del terreno seleccionado (figura 4.1), que han dado los siguientes resultados. En la primera de ellas (muestra 1) la altura alcanzada por el suelo aportado al ensayo es de 64 mm. Se busca la zona en la que dejan de ser apreciables los granos del material, siendo una zona de transición en torno a los 40 mm. Este valor teórico marcaría el paso de las arenas a una zona limo-arenosa, que llegaría hasta los 51 mm de altura en la probeta. A partir de ese punto se aprecia un cambio de color en el material depositado que puede indicar la presencia de arcillas, manteniendo un tono uniforme hasta los 64 mm finales. Obteniendo el porcentaje de cada una de estos espesores de capas sobre el espesor total de la muestra encontramos que alrededor un 62,5 % del material se correspondería con la zona arenosa, coincidiendo aproximadamente con aquel que quedaría retenido por un tamiz 0,125, mientras que un 17,2 % correspondería con la zona retenida antes del tamiz 0,063, quedando un 20,3 % como restante que se podrían considerar finos. De forma análoga se han examinado los datos de la muestra 2, quedando resumidos en la tabla 4.1 los valores obtenidos de ambas. Visualmente, sobre las dos muestras de sedimentación, se aprecia una gran cantidad de material fino depositado entre los huecos del árido de mayor tamaño, y que es imposible de medir por este método.

	Muestra 1	% sobre el total	Muestra 2	% sobre el total	Valor medio
Altura de muestra	64 mm		76 mm		
Altura zona arena >0,125	40 mm	62,5 %	47 mm	61,8 %	62,1 %
Altura zona limo-arenosa >0,063	11 mm	17,2 %	17 mm	22,4 %	19,8 %
Altura zona finos <0,063	13 mm	20,3 %	12 mm	15,8 %	18,1 %

Tabla 4.1: Resumen de datos de pruebas de granulometría por sedimentación

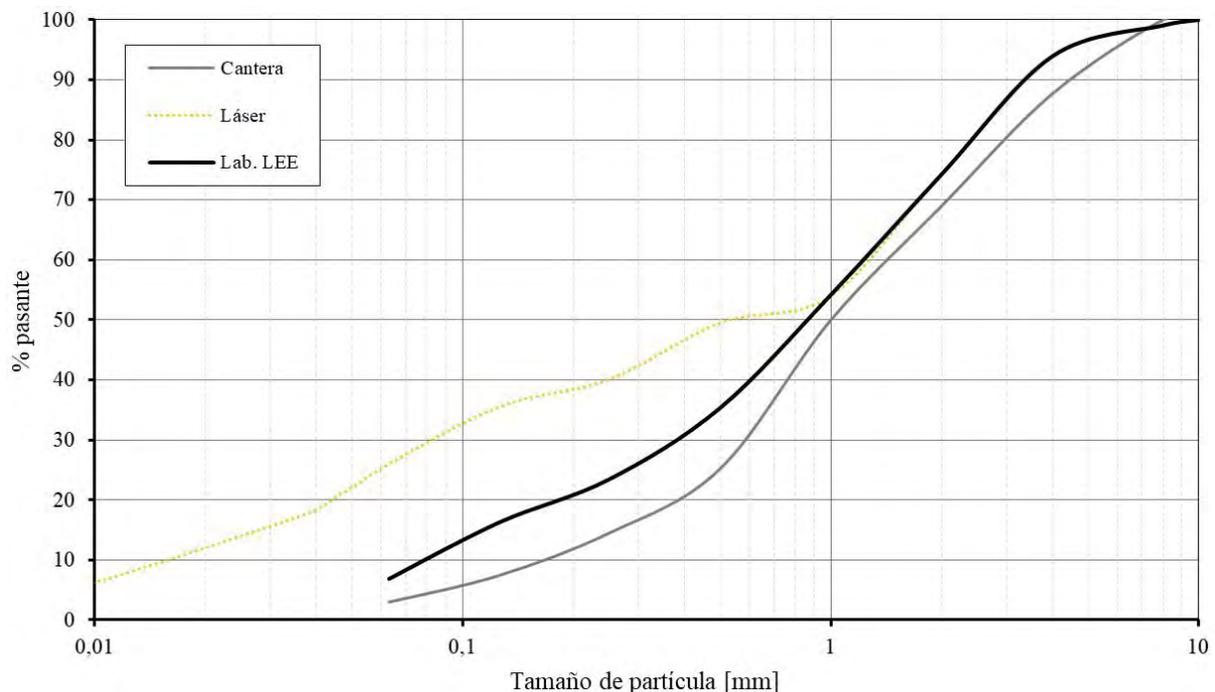


Figura 4.4: Curvas de granulometría del material seleccionado, según la cantera, el laboratorio LEE y la granulometría laser

De forma paralela al ensayo de granulometría por sedimentación se realiza otro ensayo de granulometría siguiendo la norma [UNE-EN:933-1 \(2012\)](#) mediante la cual se obtiene la curva

granulométrica que aparece en la figura 4.4 como Lab.LEE. En esa misma figura se dibuja también la curva granulométrica aportada por la cantera al suministrar el material, pudiendo observarse una discrepancia general entre los datos aportados y los obtenidos en el laboratorio LEE. Hay que indicar que las muestras analizadas tienen siempre un tamaño de árido inferior a 10 mm, ya que se ha limitado superiormente el material en función del tamaño de las posteriores probetas a realizar. Se observa como toda la serie presenta una mayor cantidad de finos, que en el tamiz 0,125 mm pasa de ser 7,4 % en los datos aportados por la cantera a 16,2 % en los obtenidos en el LEE. El principal motivo de esta diferencia reside en la gran cantidad de finos que permanecen pegados a los áridos, y que no llegan a desprenderse de éstos, por lo que no resulta fácil realizar el ensayo de granulometría, pudiendo minusvalorar su presencia real.

Ante este problema se ha optado por realizar un ensayo mediante el método de difracción láser, también conocido como *granulometría láser*, midiendo las partículas de tamaño inferior a 1 mm. Este ensayo fue realizado por el Departamento de Geodinámica de la UGR, según las indicaciones que aparecen en ISO:13320 (2020). Los datos obtenidos aparecen también en la figura 4.4, junto con los otros dos ensayos anteriores. Se aprecia de forma clara como la gran cantidad de finos adheridos a los áridos observada previamente modifica significativamente la curva granulométrica del material. Si se toma de nuevo como referencia el tamiz 0,125 mm se comprueba que con este método ha pasado un 35,5 % de material por él, lo que supone un gran incremento respecto de los dos ensayos anteriores. Si se hace la comparación de los tres ensayos en relación al material que pasa por el tamiz 0,063 mm encontramos que en el caso de la granulometría aportada por la cantera el valor es de un 2,0 %, frente al 6,9 % obtenido en el LEE y un 26 % indicado por el procedimiento de granulometría laser. De algún modo este problema ya se anunciaba al referir la gran cantidad de finos que quedaba depositada entre el árido en las pruebas de sedimentación, y cuya cuantificación se hacía imposible. Aún así la relación entre ambos métodos no es posible, dada la distinta manera en la que se contabiliza el material, por lo que finalmente se opta por tomar como correcta la granulometría obtenida en el laboratorio LEE.

Los resultados de granulometría obtenidos se comparan en la figura 4.5 con los valores máximos y mínimos indicados en los trabajos de Bauluz del Río y Bárcena (1992), Houben y Guillaud (1994) y Walker (2002) como límites para considerar una tierra como apta para su uso en la ejecución de tapias. Se observa como la curva del material seleccionado encaja de forma bastante correcta en los valores indicados por Houben y Guillaud (1994), salvo en la zona a partir del tamaño 0,1 mm. Frente a los límites indicados por los otros dos autores, el suelo seleccionado mostraría, en teoría, una falta general de finos. Por otro lado se pone de manifiesto también que no existe una gran concordancia entre los propios autores, y por tanto entre las propias normativas o manuales que se desarrollan a partir de sus trabajos. Hay que indicar y recordar que en estos documentos se pretende caracterizar el material para la ejecución de nuevos tapias, mientras que esta tesis se centra en el estudio de las estructuras patrimoniales ya existentes.

Por ese motivo se realiza una comparación de la granulometría del material seleccionado con las granulometrías obtenidas en los edificios de tapial más representativos de la ciudad de Granada (Ontiveros *et al.*, 2008) y en las murallas de San Juan de Aznalfarache (Alejandro y Martín del Río, 2012). Como se puede observar en la figura 4.6 la curva del material seleccio-

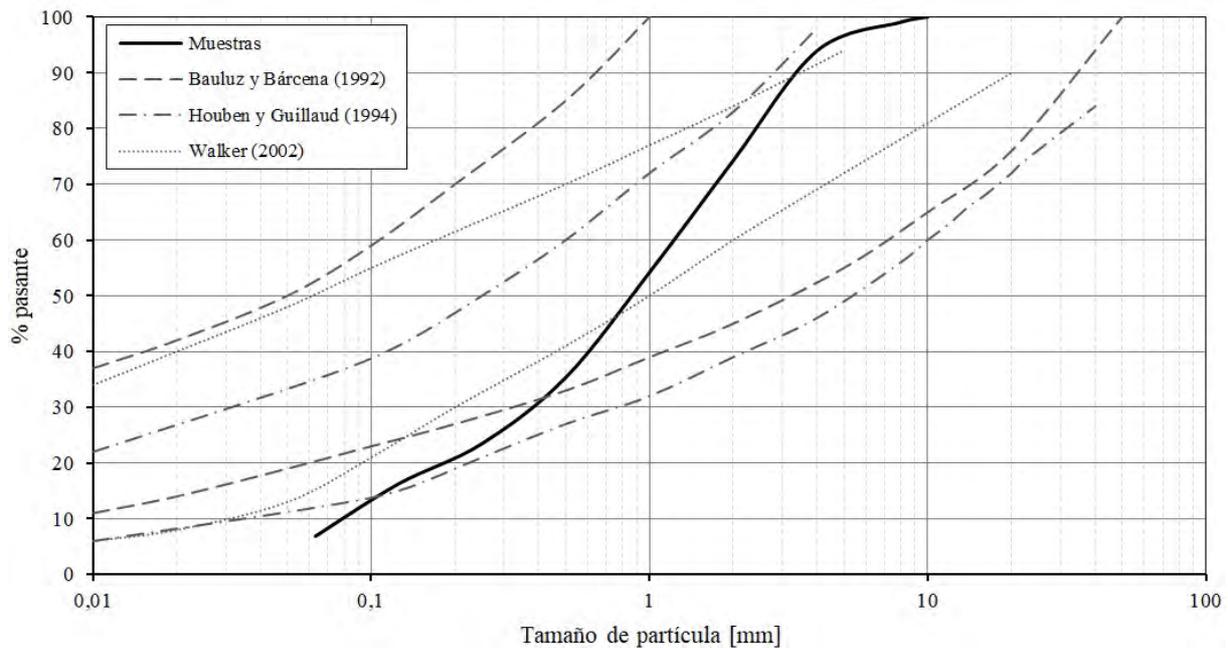


Figura 4.5: Comparación de la curva granulométrica del material seleccionado con los máximos y mínimos de los autores citados

nado (*Muestras*) y los utilizados en estas estructuras históricas tienen una relación coherente, si bien en la zona de árido menor de 0,1 mm sólo se aproxima a dos de los ejemplos. Se constata además que no existe tampoco uniformidad entre las granulometrías de las distintas localizaciones de los tapias, ni por su fecha de ejecución y ni por su emplazamiento. Como ejemplo se puede realizar una comparación entre los datos obtenidos de la muralla de la Alcazaba Cadima (s. XI) y la muralla conocida como cerca de Don Gonzalo (s. XIV). Entre ellas hay una gran diferencia en la zona de material arenoso grueso, entre los 2 y los 10 mm de tamaño de partícula, pero son coincidentes en la cantidad de finos, tomados en ambos casos como el material por debajo del tamiz 0,1 mm.

Recordemos nuevamente que una de las ventajas que tiene la construcción con tapial es la de obtener el material directamente del terreno en el que se ejecuta el edificio, por lo que no siempre tendrá una graduación *correcta*. Así estas diferencias pueden deberse a la propia naturaleza del material obtenido *in situ*, sin que sobre él se haya producido un trabajo posterior de corrección. En ese sentido se pueden consultar los trabajos realizados por el laboratorio de geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas en el año 1994 para el Patronato de la Alhambra y Generalife (CEDEX, 1994) titulado *Caracterización geotécnica de las condiciones de cimentación del conjunto monumental de la Alhambra y Generalife*. En este trabajo se obtuvieron muestras de terreno mediante dos sondeos ejecutados donde se sitúa el recinto de la Alhambra y el Generalife. Ambos sondeos muestran valores muy parecidos y aparecen indicados en la figura 4.7.

En esa misma figura 4.7 aparecen las curvas de diez muestras tomadas de las tapias del Generalife, obtenidas por Martínez y González (2005). Se observa como todas ellas presentan comportamientos relativamente parecidos, relacionándose de forma bastante ajustada a los datos del terreno que aparecen en trabajo de CEDEX (1994). Este hecho responde a que, ló-

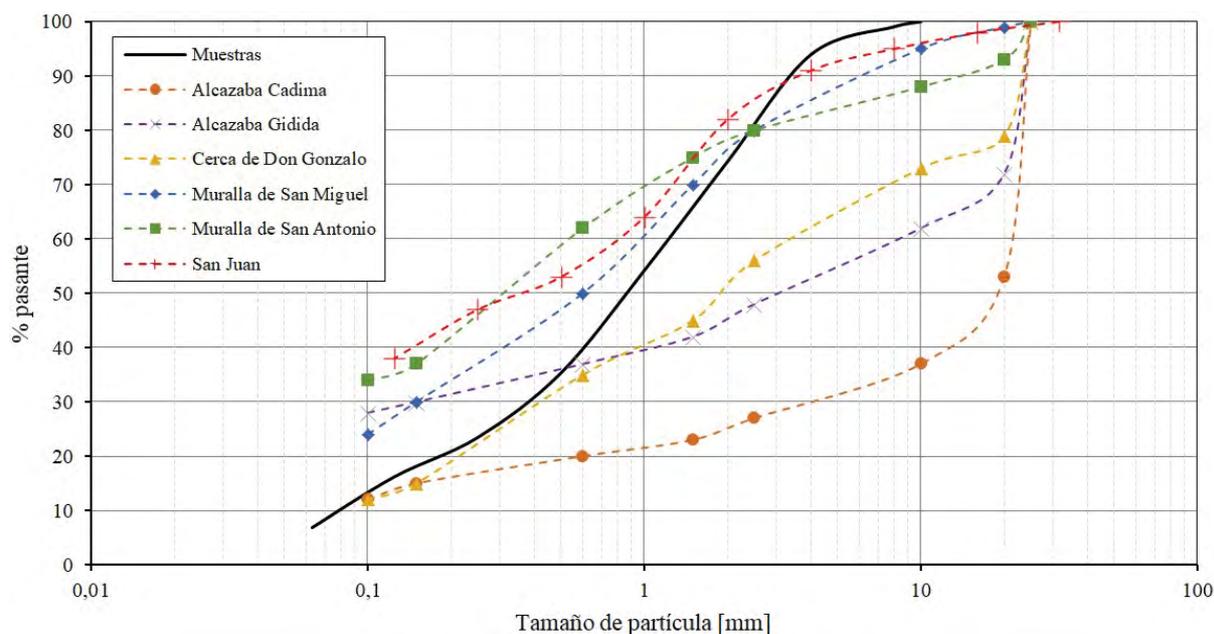


Figura 4.6: Comparación de las curvas granulométricas del material seleccionado con las murallas de la ciudad de Granada y de San Juan de Aznalfarache (Sevilla)

gicamente, están ejecutadas con ese mismo suelo, como ya se ha indicado en varias ocasiones al referir las características del tapial. A su vez, en la misma figura 4.7 aparecen las curvas de valores máximos indicados por Bauluz del Río y Bárcena (1992), Houben y Guillaud (1994) y Walker (2002). Si se comparan los valores obtenidos en las tapias del Generalife con los valores *normativos* indicados por los autores se aprecia como los tapias históricos del entorno no se ajustan a dichos valores, presentando en todos los casos un diámetro de partículas mayor. No sólo las curvas de las tapias del Generalife presentan estos valores, sino lógicamente el suelo de la zona ofrece el mismo comportamiento. Esta metodología aparece ya en el trabajo realizado por Gomes *et al.* (2014) sobre edificios patrimoniales en Portugal, quedando sin embargo éstos muy bien encuadrados dentro de los valores máximos y mínimos indicados por Houben y Guillaud (1994), a diferencia de lo observado en los datos aportados por los trabajos de campo indicados.

Si se pone el punto de vista en los datos que aparecen para el tamaño de partícula 0,1 mm se observa como todos los valores se encuentran entre el 2 % y el 15 %, mientras que el terreno seleccionado para las probetas (*Muestras*) presenta un valor del 13 %. Por tanto, se entiende que el material seleccionado cumple con los requisitos indicados por los autores de los citados documentos normativos, a la vez que se acerca claramente a los datos de los tapias históricos.

Finalmente, a partir de los ensayos recibidos de la cantera, se puede indicar que los contenidos en sales del material seleccionado presenta valores de sulfatos de un 0,0017 % y de cloruros en un 0,0019 %. De igual manera no se aprecian signos de presencia de materia orgánica, azufre o contaminantes ligeros. Por tanto, finalmente, se entiende que el material seleccionado se adapta a las granulometrías tradicionales, siendo por tanto válido para realizar las posteriores probetas.

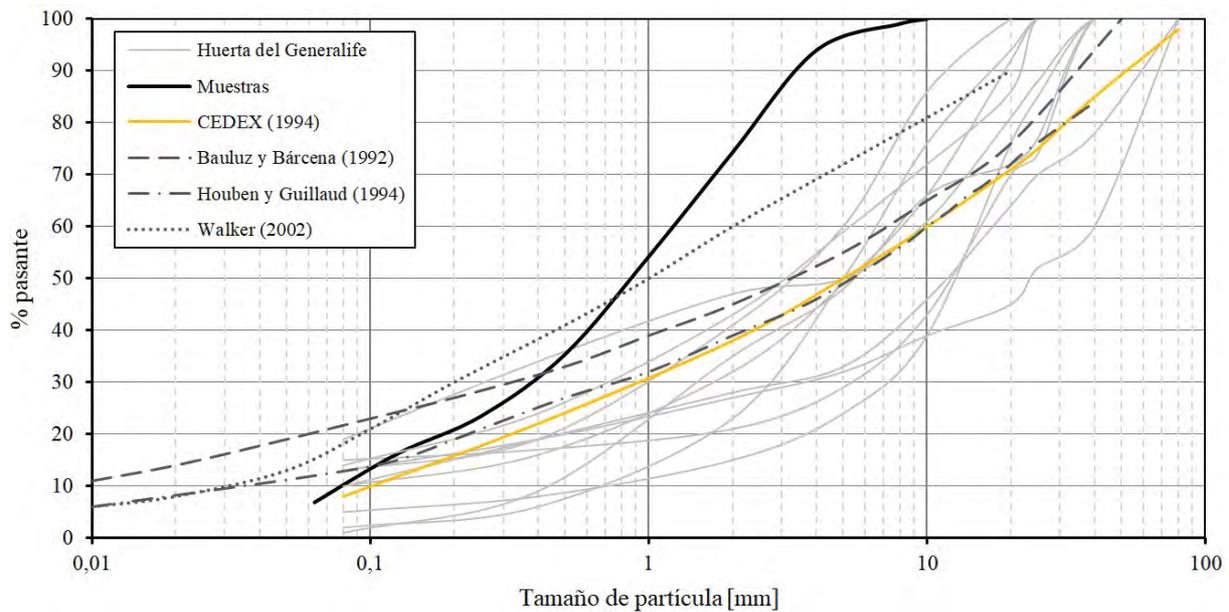


Figura 4.7: Curvas granulométricas de las tapial del Generalife y del subsuelo de la colina de la Sabika

4.2.2. La cal

La cal es un conglomerante de uso muy extendido por todo el mundo, y utilizado de forma abundante desde hace muchos miles de años. Sin entrar en mucho detalle sobre este asunto se puede indicar la presencia de morteros de cal en la ciudad de Jericó hace unos 10.000 años. Posteriormente su uso alcanzó todas las culturas antiguas, utilizándose tanto en edificación como en sistemas de transporte de agua y pavimentos, empleándose de forma continuada hasta los inicios del siglo XX, momento en el que la aparición de los cementos relegó a la cal a un plano meramente decorativo (González Cortina, 2000), (Robador, 2012), (Barba y Villaseñor, 2013), (Rodríguez *et al.*, 2014). Su uso como aglomerante en morteros aparece en prácticamente todos los edificios patrimoniales que han llegado hasta nosotros, en distintas aplicaciones, pero siempre aportando sus cualidades de dureza y resistencia.

La más significativa de todas esas cualidades que presenta la cal es la de *intentar* convertirse nuevamente en la piedra de la que proviene, el carbonato cálcico, cerrando así lo que se conoce como *ciclo de la cal*. Este ciclo comienza una vez extraído el material de la cantera, en forma de carbonato cálcico CaCO_3 , siendo sometido a un proceso denominado calcinación, mediante la incorporación de calor. Este proceso de calcinación necesita un aporte de energía muy potente, hasta alcanzar una temperatura en torno a los 800-1000°C. Poder llegar hasta esta temperatura en los hornos era el principal motivo por el cual la cal fue durante mucho tiempo un materia muy costoso, ya que además de su extracción y manipulación requería una gran cantidad de madera como combustible para la su calcinación. Durante el proceso de calcinación se pierde una molécula de dióxido de carbono CO_2 pasando a obtener óxido de calcio CaO . Este óxido es conocido también como *cal viva*, y presenta un gran comportamiento cáustico debido a su alta alcalinidad, pudiendo provocar lesiones cutáneas, oculares o en las vías respiratorias ante una exposición prolongada (Castillo *et al.*, 2013).

El siguiente paso en el ciclo de la cal es el *apagado* de la cal viva, óxido de calcio (CaO), mediante la adición de agua. Este apagado provoca un fuerte proceso exógeno, con una gran liberación de calor, dando como resultado hidróxido cálcico $\text{Ca}(\text{OH})_2$, siendo éste el producto que se comercializa habitualmente, y que se utilizará junto con agua y la tierra seleccionada para ejecutar los tapiales de las probetas. La duración de este proceso de hidratación dependerá de la cantidad de impurezas presentes en el óxido de calcio, pudiendo extenderse desde las dos semanas indicadas en la norma [NBE-FL-90 \(1990\)](#), a varios meses según otros autores como [Swallow y Carrington \(1995\)](#) o incluso varios años como apuntaban autores clásicos de la talla de Plinio o Vitrubio ([Cazalla et al., 2002](#)). Este hidróxido cálcico, también conocido como cal hidratada o *portlandita*, irá perdiendo durante su fraguado moléculas de agua a la vez que irá recuperando moléculas de CO_2 del aire, hasta volver a convertirse en CaCO_3 , el carbonato cálcico inicial, cerrando así el ciclo de la cal, como se indica de forma esquemática en la figura 4.8 ([Van Balen, 2003](#)), ([Galván-Ruiz et al., 2009](#)).

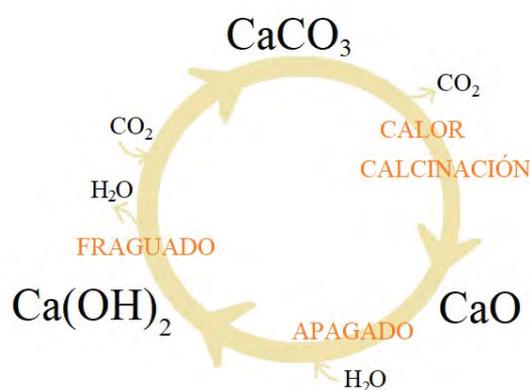


Figura 4.8: Esquema resumen del ciclo de la cal

La cal que ha sido seleccionada para ejecutar las probetas se incorpora en forma de hidróxido cálcico, tipo i.pro CALIX NHL 3,5 de la marca FYM HeidelbergCement, empresa que ha cedido el producto para la realización de esta tesis. Esta cal es conforme a la norma europea [UNE-EN:459-1 \(2011\)](#) de cales de construcción y es producto de la calcinación de una caliza margosa, posteriormente apagada. Se ha mantenido en condiciones de laboratorio durante la ejecución de las probetas, evitando el contacto con el aire y la humedad.

4.3. Dosificación de la mezcla del tapial

Una vez que se han seleccionado los materiales constituyentes del tapial (tierra y cal) se debe elegir una dosificación o relación entre ambos. Para ello se revisa la documentación existente sobre dosificaciones tradicionales, y en particular sobre las empleadas en los tapiales del entorno. Una serie de datos muy interesantes a este respecto se encuentran en el trabajo de [De la Torre \(1994\)](#) titulado *Estudio de los materiales de construcción de la Alhambra*. La autora parte de una determinada cantidad de material, obtenido directamente del monumento, y divide su análisis en dos pasos. El primero se centra en obtener la proporción existente entre los componentes de la matriz (compuesta por cal como ligante y árido fino), mientras que en

el segundo obtiene la relación entre el árido grueso y la matriz, pudiendo por tanto a partir de los datos obtenidos en las dos pruebas cuantificar las proporciones entre los tres componentes, árido grueso, árido fino y cal. La autora entiende como árido fino el que presenta un tamaño de partícula inferior a los 5 mm.

En el primer ensayo obtiene la proporción en peso de la calcita respecto al árido fino mediante difracción de rayos X, previa comprobación de la ausencia de árido calcítico, según las indicaciones que aparecen en [Alessandrini et al. \(1992\)](#). Una vez cuantificado la relación entre calcita y árido fino utiliza la técnica del análisis de imagen para cuantificar la relación entre árido grueso y la matriz. En la tabla 4.2 se indican los porcentajes obtenidos y la proporción de las muestras extraídas en la Alcazaba de la Alhambra, denominadas ALC15 y ALC16. La primera de ellas se extrae de la cara externa del muro, mientras que la segunda se extrae de la zona interna, mostrando dosificaciones 3:1 y 5:1 respectivamente.

Alcazaba (ALC15)			
Matriz	Árido fino 66 %	Ligante 34 %	
Total	Árido 73 % (52 % fino + 21 % grueso)	Ligante 27 %	Proporción 3:1
Alcazaba (ALC16)			
Matriz	Árido fino 77 %	Ligante 23 %	
Total	Árido 84 % (52 % fino + 32 % grueso)	Ligante 16 %	Proporción 5:1

Tabla 4.2: Dosificaciones históricas del tapial en la Alhambra según [De la Torre \(1994\)](#)

Dosificaciones similares aparecen en el trabajo de [Valverde-Espinosa et al. \(1997\)](#), donde se indica que los tapias de las murallas de la ciudad de Granada presentan valores entre un 25 y un 30 % de cal adicionada a la tierra. Esto supondría dosificaciones entre 4:1 y 3:1. Por otro lado en [Graciani y Tabales \(2008\)](#), para el ámbito de la ciudad de Sevilla, se encuentran valores de dosificación muy parecidos, con valores entre un 22 y un 38,8 % de cal en la masa del tapial, lo que sensiblemente supone una proporción entre 4:1 y 2,5:1.

A partir de estos datos se ejecutarán las probetas para los posteriores ensayos descritos en esta tesis, utilizando las dosificaciones 3:1 y 4:1, siendo estas las dos dosificaciones que se podrían entender como más habituales para las estructuras de tapial patrimonial del entorno.

4.4. Fabricación de los encofrados del tapial

Continuando con el planteamiento de trabajo que se ha indicado en varias ocasiones, reproducir de la manera más exacta un tapial tradicional, se ha optado por construir moldes de madera como encofrado para ejecutar las probetas, elaborados con tablero de pino de 18 mm de espesor. Posteriormente se impregnan en aceite para evitar la succión del agua de las probetas por parte de la madera. Se utilizan dos moldes con dimensiones interiores 100 x 100 mm y 440 x 100 mm, siendo la altura controlada mediante una marca situada a 100 mm de la base del molde. Se utilizan los mismos elementos tradicionales que aparecen en la figura 4.9, donde se recoge una enumeración de todas las partes que componen un cajón de tapial, así como un esquema de todo el conjunto montado. Por razón del tamaño de las probetas algunos de estos elementos no son necesarios, si bien se utilizan prácticamente todos ellos.

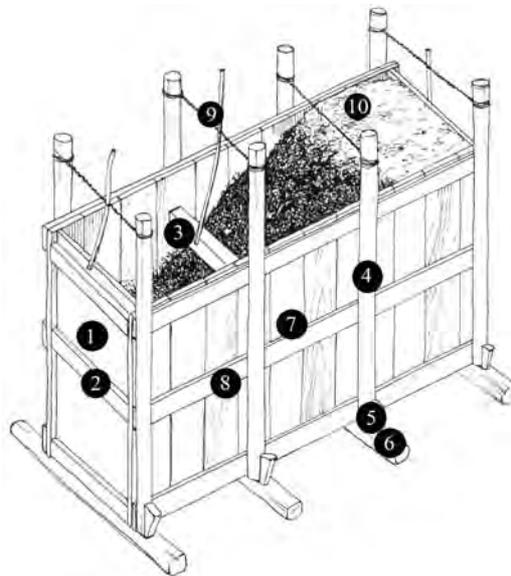


Figura 4.9: Elementos materiales que conforman un tapial tradicional (Gasparini y Margolies, 1986)

- | | | | | |
|--------------|--------------|----------|-------------|------------|
| 1. Compuerta | 3. Travesaño | 5. Cuña | 7. Costado | 9. Tórtolo |
| 2. Codal | 4. Paral | 6. Aguja | 8. Traviesa | 10. Tierra |

Sobre los laterales de los moldes de encofrado, lo que serían los costados, se clavan dos listones de madera a modo codales en los que quedarán apoyados las compuertas, impidiendo que éstas se desplacen hacia el exterior. El efecto de las agujas y las cuerdas de los tórtolos se consigue con varillas roscadas de 3 mm de diámetro que atraviesan los codales quedando por el exterior de las compuertas. Finalmente todo el conjunto queda sujeto mediante tuercas y arandelas que realizan la misión de las cuñas. La colocación de las compuertas entre los costados hace que actúen a su vez de tope, a modo de travesaño, quedando el conjunto estable y sólido, preparado para recibir la mezcla de la tierra. En la figura 4.10 se muestran dos imágenes de los encofrados de 100 x 100 mm y de 440 x 100 mm. A la izquierda en la imagen aparece el utilizado para las probetas prismáticas y a la derecha el usado para las cúbicas.



Figura 4.10: Moldes desmontables de madera para fabricación de las probetas de tapial

4.5. Ejecución de las probetas

4.5.1. Amasado

De forma previa al propio amasado se realiza un cribado de la tierra con un tamiz de 10 mm, eliminado todo el árido por encima de esta medida. Aunque en las estructuras de tapial se encuentran áridos de tamaño muy superior a éste, la sección de las probetas a realizar (100 x 100 mm) limita el tamaño máximo de árido que se debe utilizar, cumpliendo así con las indicaciones que aparecen en la norma [UNE-EN:12504-4 \(2006\)](#) *Determinación de la velocidad de impulsos ultrasónicos*, como se verá más adelante. Además esta limitación tiene como intención limitar la presencia y posibles agrupaciones de árido de diámetros altos, que harían que las probetas presentaran una debilidad importante durante los ensayos destructivos.

Una vez cribado el material se mezcla la tierra con la cal, en las dos proporciones indicadas 3:1 y 4:1, con distintos porcentajes de agua en peso, según se indica en la tabla 4.4. En esa tabla se observa que el porcentaje de agua utilizado en las probetas cúbicas se ha ido modificando con la intención de comprobar la influencia sobre los resultados posteriores, mientras que en las probetas prismáticas la cantidad de agua es fija, para no introducir más variables en el estudio.

Todos los materiales son amasados a mano hasta conseguir una mezcla correcta de todo el conjunto, contando también con la ayuda de una amasadora planetaria para controlar la calidad del amasado manual. Como primera opción de amasado se opta por la configuración de velocidad y tiempo indicados en la norma [UNE-EN:196-1 \(2018\)](#), comprobando que las texturas conseguidas de forma manual son muy parecidas. Durante el desarrollo del trabajo se utiliza una programación propia de amasado con una velocidad de rotación de $140 \pm 5 \text{ min}^{-1}$ y una velocidad de movimiento planetario de $62 \pm 5 \text{ min}^{-1}$ durante 1 minuto, observando que no es necesario que el proceso tenga una mayor duración.

4.5.2. Compactación

Una vez que se ha confeccionado la amasada se procede a su vertido dentro de los moldes de encofrado, hasta llegar a una altura de tongada de material de unos 30 mm. A continuación se procede a su compactación mediante la acción de una maza manual hasta reducir el espesor de la tongada a un valor entre el 65 y el 50 % del inicial, con lo que pasa a tener un espesor aproximado a los 15 a 20 mm. Sobre esta tongada compactada se vuelve a verter otra capa de material, que es compactada igualmente. De forma sucesiva se completa todo el espesor de la probeta, hasta alcanzar los 100 mm, lo que significa que cada probeta está confeccionada con entre 5 y 6 tongadas.

El control del espesor de la última tongada, la que concluye el tamaño final de la probeta, debe realizarse de forma experimental, ya que al verter el material sobre el molde se sobrepasan las medidas gravadas en las paredes de éste y que sirven de control al espesor final. Este es el motivo por el cual la altura de las probetas no quede ajustada a los 100 mm, si bien, como se puede comprobar en las tablas 4.3 y 4.4, su variación no es significativa.

En la tabla 4.4 se indican las fechas de fabricación, dosificaciones, contenido de agua de amasado, dimensiones y densidad inicial de las diez series de probetas ejecutadas. También aparecen los datos de una probeta, denominada 11, ejecutada con una menor densidad, mediante la aplicación de una menor energía de compactación. Esta probeta proporcionará valores propios durante la serie de ensayos posteriores a aplicar a todo el conjunto, que serán puestos en relación con los aportados por las demás series. En total se ejecutan 44 probetas cúbicas.

Por su parte en la tabla 4.3 aparecen los datos relativos a las probetas prismáticas. En este caso las amasadas presentan un contenido fijo de agua del 9 %, para evitar que la acumulación de variables haga más complejo el posterior análisis de los resultados obtenidos de los ensayos. Se ejecutan 12 probetas prismáticas que posteriormente llegarán a convertirse en 27 probetas cúbicas, mediante sucesivos cortes. En la figura 4.11 se puede ver una de las probeta prismáti-

cas desmoldada y el almacenamiento de todas las probetas en el laboratorio LEE. Las probetas prismáticas se depositan sobre paneles de entramado metálico (tipo *tramex*) para asegurar un correcto y constante contacto con el aire de todas las caras de las probetas, mientras que las cúbicas son volteadas de manera manual diariamente. Este contacto con el aire se vuelve necesario para garantizar un mismo nivel de carbonatación en todos los frentes.



Figura 4.11: Probeta prismática desmoldada y almacenamiento de probetas cúbicas y prismáticas en laboratorio LEE

Probeta	Fecha de ejecución	Dosificación	Dimensiones (mm)			Peso inicial (g)	Densidad inicial (g/cm ³)
			a	b	h		
P-1	26/06/2019	3:1	441,75	101,10	104,80	10149	2,17
P-2	15/05/2019	3:1	443,00	101,18	103,01	9970	2,16
P-3	13/05/2019	3:1	443,00	102,00	102,48	10063	2,17
P-4	04/06/2019	3:1	443,25	101,50	105,80	10001	2,10
P-5	04/06/2019	3:1	443,25	101,28	105,45	9919	2,10
P-6	06/06/2019	3:1	443,50	101,75	103,12	10159	2,18
P-7	15/05/2019	4:1	442,88	101,25	104,16	10101	2,16
P-8	03/06/2019	4:1	443,80	101,08	103,26	10133	2,19
P-9	03/06/2019	4:1	444,25	101,16	105,80	10189	2,14
P-10	06/06/2019	4:1	444,03	101,62	101,24	10131	2,22
P-11	07/06/2019	4:1	443,10	101,45	102,91	10172	2,20
P-12	07/06/2019	4:1	444,50	101,32	102,31	10100	2,19

Tabla 4.3: Resumen de datos iniciales de probetas prismáticas de tapial

Serie <i>fecha de ejecución</i>	Dosificación	Agua (%)	Probeta	Dimensiones (mm)			Peso inicial (g)	Densidad inicial (g/cm ³)
				a	b	h		
1 <i>18/02/2019</i>	3:1	9	1.1	100,45	103,61	101,38	2278	2,16
			1.2	100,55	102,32	103,01	2293	2,16
			1.3	100,35	101,89	101,09	2439	2,36
			1.4	100,45	101,42	104,41	2365	2,22
2 <i>13/03/2019</i>	3:1	10	2.1	100,26	100,75	102,48	2253	2,18
			2.2	100,18	101,52	100,36	2218	2,17
			2.3	100,22	101,05	103,75	2268	2,16
			2.4	100,27	100,78	100,84	2168	2,13
3 <i>14/03/2019</i>	3:1	8	3.1	100,40	101,82	104,57	2128	1,99
			3.2	100,46	101,24	101,74	2060	1,99
			3.3	100,34	101,03	102,82	2083	2,00
			3.4	100,41	100,78	102,91	2060	1,96
4 <i>18/03/2019</i>	4:1	8	4.1	101,83	99,71	104,39	2122	2,00
			4.2	101,92	99,92	106,02	2210	2,05
			4.3	100,06	102,04	106,89	2226	2,04
			4.4	100,07	102,07	103,70	2135	2,02
5 <i>25/03/2019</i>	4:1	9	5.1	100,18	102,37	100,87	2159	2,09
			5.2	99,86	102,27	104,24	2212	2,08
			5.3	99,97	101,67	103,01	2230	2,13
			5.4	99,98	101,68	103,49	2265	2,15
6 <i>25/03/2019</i>	4:1	10	6.1	99,70	101,69	101,09	2222	2,17
			6.2	100,13	101,34	100,42	2180	2,14
			6.3	100,64	101,14	99,62	2195	2,16
			6.4	99,98	100,92	96,29	2279	2,35
7 <i>02/04/2019</i>	4:1	9	7.1	100,00	102,32	105,18	2316	2,15
			7.2	100,29	102,24	100,95	2117	2,05
			7.3	100,27	101,80	108,59	2407	2,17
			7.4	100,39	101,75	104,01	2284	2,15
8 <i>02/04/2019</i>	4:1	8	8.1	100,63	102,25	102,95	2212	2,09
			8.2	100,50	101,79	105,40	2214	2,05
			8.3	100,29	101,44	103,16	2176	2,07
			8.4	100,52	101,54	106,15	2254	2,08
9 <i>22/04/2019</i>	4:1	10	9.1	100,01	102,20	101,60	2212	2,13
			9.2	100,05	101,55	102,78	2284	2,19
			9.3	99,93	101,57	93,88	2232	2,34
			9.4	100,05	101,46	101,62	2232	2,16
10 <i>06/05/2019</i>	3:1	9	10.1	99,86	102,19	106,10	2189	2,02
			10.2	99,89	102,67	110,27	2328	2,06
			10.3	100,27	102,94	104,63	2240	2,07
			10.4	100,51	102,81	105,03	2252	2,07
11* <i>19/02/2019</i>	3:1	9	11.1	100,19	101,14	101,99	1808	1,75
			11.2	100,32	100,88	99,11	1803	1,80
			11.3	100,34	101,03	102,82	1847	1,77
			11.4	100,26	100,94	103,70	1891	1,80

Tabla 4.4: Resumen de datos iniciales de probetas cúbicas de tapial

Capítulo 5

Ensayos destructivos. Compresión sobre probetas y sub-probetas cúbicas

Todas las probetas cúbicas (44) y las sub-probetas cúbicas ssP (27) provenientes de las probetas prismáticas originales se sometieron a ensayos destructivos de compresión, para obtener la resistencia máxima a compresión ($f_{c,max}$), el módulo de elasticidad en compresión (E_c) y el coeficiente de Poisson en compresión (ν_c) a través de este método destructivo. También se han tomado datos en esta fase de los frentes de carbonatación de las probetas tras su rotura en la prensa, que se analizarán posteriormente.

La caracterización a partir de ensayos de compresión sobre materiales de diversa naturaleza ha sido muy utilizada como una de las formas más básicas para conocer su resistencia. De hecho la resistencia a compresión es quizás la forma más básica, intuitiva y fácil de caracterización de un material, siendo incluso la base de la nomenclatura de los materiales más comunes en edificación (hormigón, mortero, ladrillo). Aún así hay que indicar que las compresiones se ven afectadas por un gran número de factores de influencia, aumentando la dispersión de los resultados por las normales diferencias que se introducen aleatoriamente en las muestras con el paso del tiempo, las distintas cantidades de material o el estado de conservación (Barrios, 1976) (Meininger, 1983) (Calavera *et al.*, 2005).

Mediante este mismo ensayo, y con el uso de transductores, se puede medir el módulo de elasticidad en compresión y el coeficiente de Poisson, quedando así el material completamente caracterizado en su régimen lineal. La literatura sobre estos ensayos es muy extensa, pudiendo ser de obligada consulta los trabajos de Mehta (1986) o Young *et al.* (2002). En este trabajo de tesis se han seguido las indicaciones para la realización del ensayo de compresión que aparecen en las normativas UNE-EN:772-1+A1:2016 (2016) y UNE-EN:12390-3 (2019), relativas a fábrica de ladrillos y probetas de hormigón respectivamente. La norma más cercana al trabajo con tapial en España puede ser la UNE:41410-08 (2008) denominada "Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo", en la que precisamente se refiere a la norma UNE-EN:772 como base para realizar los ensayos de compresión. De hecho también los bloques de tierra comprimida (BTC-1, BTC-3 y BTC-5), tienen

su denominación en función de su resistencia a compresión.

5.1. Metodología de realización de ensayos a compresión sobre probetas cúbicas

Los ensayos de compresión sobre las 44+27 probetas cúbicas se han llevado a cabo siguiendo las especificaciones de las citadas normas, utilizando una prensa de la marca Ibertest modelo Testronic-100-MD2 instalada en el Laboratorio de Ingeniería de Construcción de la UGR. La adquisición de datos de deformación se realiza mediante transductores LVDT de la marca HBM, modelo WA/10mm y un Quantum MX 840B también de la marca HBM. En todos los casos se utiliza el software suministrado con los equipos. En la figura 5.1 se puede ver el montaje de los equipos indicados para la realización del ensayo. Se colocan dos transductores LVDT para medir la disminución de tamaño de la probeta en vertical y poder obtener los módulos elásticos y otros dos LVDT enfrentados para capturar el aumento de tamaño en horizontal, datos que servirán posteriormente para el cálculo de los coeficientes de Poisson. Todos los transductores se colocan de forma simétrica a los ejes de la probeta, quedando además ésta apoyada en el centro del plato inferior de la prensa.



(a) Prensa y equipos de captación de datos

(b) Probeta cúbica con transductores instalados

Figura 5.1: Prensa y equipos de captación de datos durante los ensayos de compresión sobre las probetas y sub-probetas cúbicas

La velocidad del ensayo se ajusta a 0,02 MPa/s, siendo este valor 10 veces inferior lo indicado por la norma [UNE-EN:12390-3 \(2019\)](#) para hormigón en masa. La elección de este valor se pone en relación con la resistencia máxima a compresión esperada para el tapial. La obtención de datos se fija en 10 Hz, tanto en la prensa como en los LDVT con el fin de poder casar los resultados posteriormente. Se obtienen las curvas de tensión deformación a partir de los datos de carga aportados por el actuador y se relacionan con los desplazamientos tanto del propio actuador como de los transductores LVDT. La velocidad de aplicación de carga y la frecuencia de

adquisición de datos han resultado ser satisfactorias para las características del tapial empleado en las probetas. Todas las curvas aparecen en el apéndice A.

Las sub-probetas cúbicas ssP se someten a un ensayo de aplicación de ciclos de carga para determinar su módulo de elasticidad secante estabilizado en compresión ($E_{C,S}$) siguiendo las indicaciones que aparecen en [UNE-EN:12390-13 \(2014\)](#) método B "Determinación del módulo secante de elasticidad estabilizado". Este método aplica tres ciclos de carga a las probetas, con comprobación de posicionamiento de las mismas y estabilidad del dispositivo de medida al final del segundo y tercer ciclo. El valor del módulo secante se calcula en el tercer ciclo.

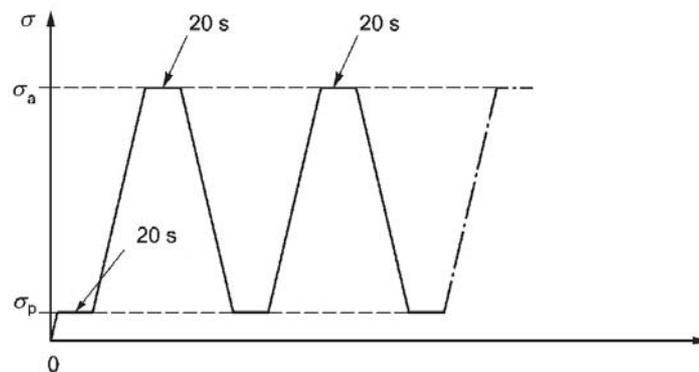


Figura 5.2: Ciclos para determinación del módulo secante de elasticidad estabilizado - método B ([UNE-EN:12390-13, 2014](#))

Los pasos que se han seguido, adaptados de las indicaciones recogidas en [UNE-EN:12390-13 \(2014\)](#), son los siguientes. Una vez colocada la probeta centrada en el plato de la prensa y dispuestos de forma correcta todos los transductores, se aplica a la probeta una *tensión de precarga* $\sigma_p = 10\%$ de la resistencia máxima a compresión esperada, a una velocidad fija de 0,02 MPa/s. Se mantiene dicha tensión σ_p durante 20 s, comprobando y ajustando los valores de los LVDT. A continuación comenzaría el primer ciclo, en el que se aumenta la tensión sobre la probeta, a la misma velocidad de 0,02 MPa/s, hasta llegar a una *tensión superior* $\sigma_a = 30\%$ de la resistencia máxima a compresión esperada. Se vuelve a mantener esa tensión σ_a durante 20 s y se mide la deformación media $\varepsilon_{a,1}$. Se descarga la probeta hasta σ_p manteniendo dicha tensión durante 20 s y midiendo la deformación media en ese intervalo $\varepsilon_{p,1}$, finalizando así el primero de los tres ciclos. En estos momentos previos a los ensayos de rotura por compresión el valor de la resistencia máxima a compresión se estima en 2 MPa.

A continuación se repite el proceso en lo que sería el segundo ciclo, obteniendo los valores de deformación media $\varepsilon_{a,2}$ y $\varepsilon_{p,2}$ de forma análoga al primer ciclo. En este segundo ciclo se comprueba que la deformación $\varepsilon_{a,2}$ no presente una diferencia superior al 20 % de los valores del primer ciclo ($\varepsilon_{a,1}$). Finalmente, en el tercer ciclo, la tensión se vuelve a incrementar, siempre con la misma velocidad, desde σ_p hasta σ_a , manteniendo también la tensión durante 20 s y calculando el valor de la deformación media $\varepsilon_{a,3}$. Por último se comprueba que la diferencia entre $\varepsilon_{a,2}$ y $\varepsilon_{a,3}$ en cada punto no es mayor del 10 %. En las sub-probetas ssP-7.2.2, ssP-9.2.2, ssP-10.2.2, ssP-11.2.2 y ssP-12.2.2 se ha incrementado un 50 % los valores de σ_p y σ_a , hasta un 15 % y un 45 % respectivamente de $f_{c,max}$, para comprobar si el valor de módulo de elasticidad secante sufre alguna variación. En la figura 5.2 se indica de forma esquemática el ensayo reali-

zado. Una vez terminado este proceso de ciclos de carga las probetas se pueden someter a los ensayos de rotura para conocer la resistencia máxima a compresión.

5.2. Obtención del módulo elástico secante a partir de ciclos de carga

Con los datos obtenidos de los ensayos de ciclos de carga se puede calcular el valor del módulo de elasticidad secante estabilizado mediante la expresión (5.1). En la figura 5.3 se muestra la toma de datos mediante los transductores de desplazamiento y el software CatmanEasy de HBM. Se observa como previo a alcanzar la tensión de precarga existe un gran desplazamiento, que está vinculado a un primer momento de ajuste. A partir de ese primer escalón de carga comienzan los ciclos que son fácilmente reconocibles. Como se ha indicado previamente se utilizan dos LVDT en cada toma de datos, para evitar que el mal funcionamiento de uno ellos haga malograr el ensayo.

$$E_{C,S} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_S} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}} \quad (5.1)$$

Donde:

σ_a^m = valor medio de la tensión superior

σ_p^m = valor medio de la tensión de precarga

$\varepsilon_{a,3}$ = valor de la deformación media superior en el ciclo 3

$\varepsilon_{p,2}$ = valor de la deformación media de precarga en el ciclo 2

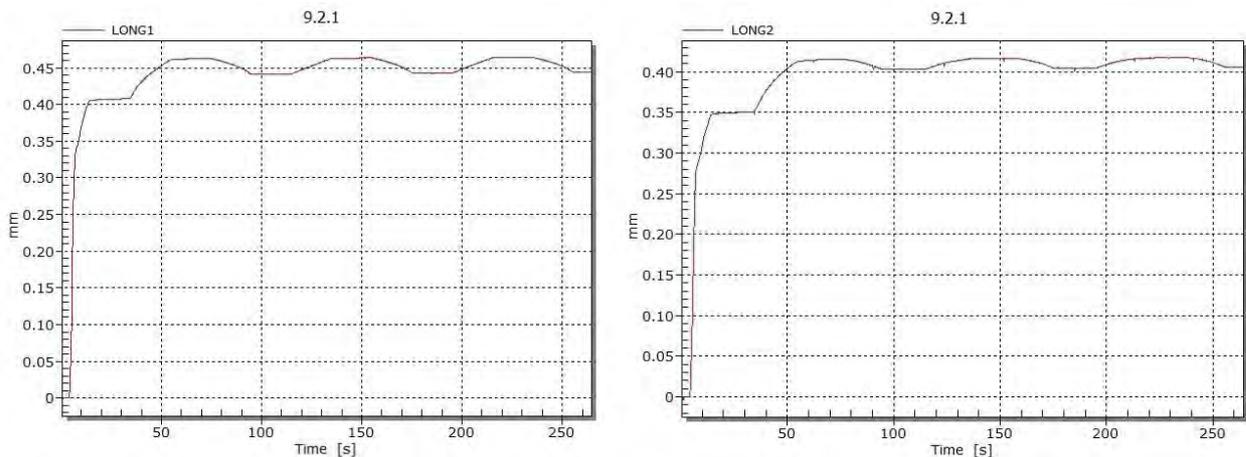
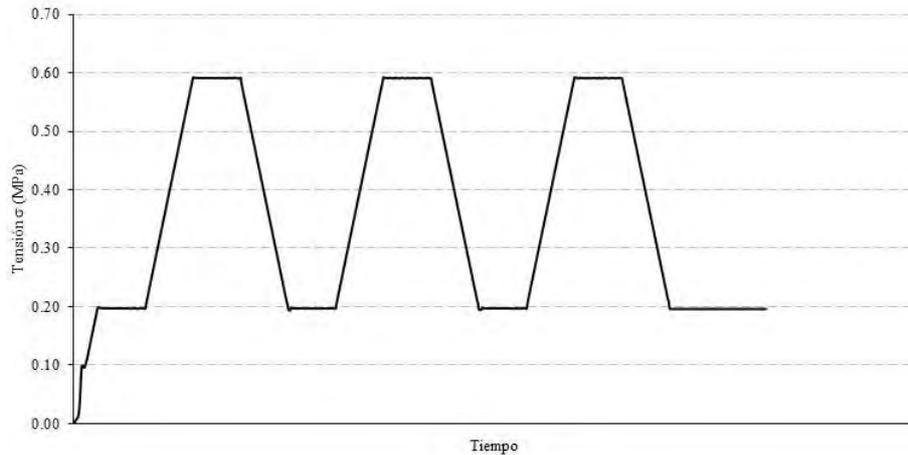


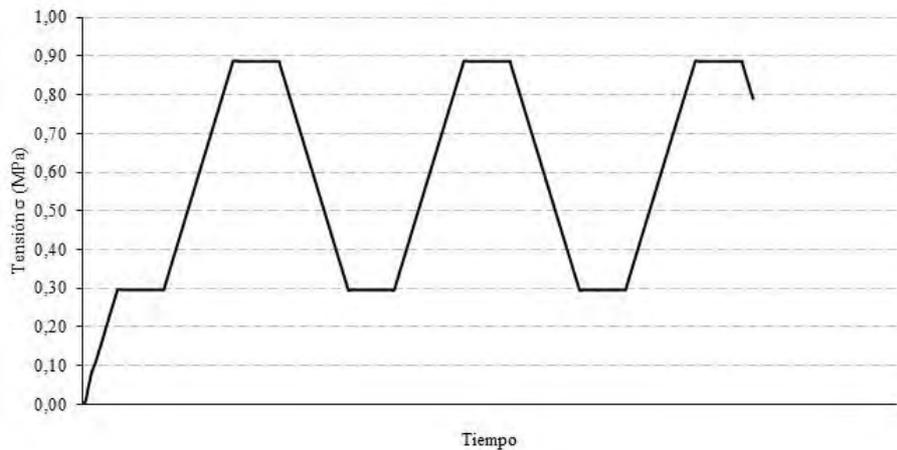
Figura 5.3: Valores de desplazamiento medidos mediante LVDT sobre sub-probeta ssP 9.2.1. Analizado con el software CatmanEasy

En la figura 5.4 se representan los valores de tensión de precarga σ_p y tensión superior σ_a en las sub-probetas cúbicas frente al tiempo del ensayo, con los valores $\sigma_p = 0,20$ MPa y $\sigma_a =$

0,60 MPa en el primero de los casos e incrementado hasta $\sigma_p = 0,30$ MPa y $\sigma_a = 0,90$ MPa en el segundo. Como se expondrá a continuación este incremento en el valor de la tensión del ensayo no modifica el valor de los módulo de elasticidad secantes.



(a) Ciclos de carga en sub-probeta cúbica ssP-1.1.1



(b) Ciclos de carga incrementados en sub-probeta cúbica ssP-12.2.2

Figura 5.4: Tensiones de ciclos de carga de sub-probetas cúbicas

En la tabla 5.1 aparecen los valores de tensión de precarga σ_p y tensión superior σ_a , así como los datos de deformación $\varepsilon_{a,3}$ y $\varepsilon_{p,2}$ obtenidos sobre las sub-probetas cúbicas ssP. También se indica el valor de módulo de elasticidad secante estabilizado calculado mediante la expresión (5.1) de cada sub-probeta cúbica y el coeficiente de Poisson. El valor medio de todas las sub-probetas cúbicas ssP es $E_{c,s} = 1736$ MPa, con desviaciones entre el +13,29 % y el -9,48 %. El coeficiente de Poisson medio es 0,24 con desviaciones desde el +16,03 % hasta el -20,23 %. Se observa como no aparecen diferencias entre las dos dosificaciones empleadas, con valores de $E_{c,s}$ y ν para las sub-probetas cúbicas 3:1 dentro de la media de la otra dosificación.

Probeta	σ_a^m (MPa)	σ_p^m (MPa)	$\varepsilon_{a,3}$	$\varepsilon_{p,2}$	$E_{c,s}$ (MPa)	σ_E %	ν	σ_ν %
ssP-1.1.1	0,5916	0,1968	0,0098	0,0096	1943		0,23	
ssP-1.1.2	0,5910	0,1968	0,0039	0,0036	1314		0,22	
ssP-1.2.1	0,5913	0,1969	0,0032	0,0030	1809		0,20	
ssP-1.2.2	0,5914	0,1968	0,0010	0,0007	1566		0,20	
				$\bar{X}E_{c,s,1}$	1658	-5,05 %	0,21	-11,94 %
ssP-6.1.1	0,5911	0,1968	0,0033	0,0030	1195		0,31	
ssP-6.1.2	0,5914	0,1969	0,0037	0,0034	1273		0,23	
ssP-6.2.1	0,5905	0,1971	0,0018	0,0016	2623		0,33	
ssP-6.2.2	0,5912	0,1968	0,0041	0,0039	1972		0,25	
				$\bar{X}E_{c,s,6}$	1766	1,10 %	0,28	16,03 %
ssP-7.1.1	0,5912	0,1969	0,0034	0,0031	1314		0,23	
ssP-7.1.2	0,5908	0,1966	0,0026	0,0023	1546		-	
ssP-7.2.1	0,5910	0,1968	0,0033	0,0030	1577		0,35	
ssP-7.2.2	0,8869	0,2955	0,0054	0,0051	1848		0,19	
				$\bar{X}E_{c,s,7}$	1571	-10,02 %	0,26	6,36 %
ssP-9.1.1	0,5906	0,1969	0,0081	0,0079	2224		0,15	
ssP-9.1.2	0,5905	0,1970	0,0123	0,0120	1502		0,23	
ssP-9.2.1	0,5908	0,1967	0,0046	0,0044	2074		0,25	
ssP-9.2.2	0,8869	0,2953	0,0070	0,0066	1557		0,25	
				$\bar{X}E_{c,s,9}$	1839	5,33 %	0,22	-8,83 %
ssP-10.1.1	0,5907	0,1970	0,0066	0,0064	1790		0,21	
ssP-10.1.2	0,5912	0,1972	0,0025	0,0023	1980		0,32	
ssP-10.2.1	0,5909	0,1970	0,0164	0,0161	1235		0,22	
ssP-10.2.2	0,8868	0,2953	0,0071	0,0067	1443		0,24	
				$\bar{X}E_{c,s,10}$	1612	-7,70 %	0,25	2,57 %
ssP-11.1.1	0,5906	0,1970	0,0023	0,0021	2206		0,35	
ssP-11.1.2	0,5908	0,1972	0,0025	0,0023	1968		-	
ssP-11.2.1	0,5914	0,1973	0,0054	0,0051	1649		0,21	
ssP-11.2.2	0,8869	0,2953	0,0038	0,0035	2043		0,28	
				$\bar{X}E_{c,s,11}$	1967	12,62 %	0,28	16,03 %
ssP-12.1.1	0,5908	0,1968	0,0031	0,0029	1970		0,12	
ssP-12.1.2	0,5913	0,1970	0,0021	0,0019	1834		0,26	
ssP-12.2.1	0,5906	0,1969	0,0042	0,0040	1834		0,19	
ssP-12.2.2	0,8866	0,2953	0,0070	0,0067	1607		0,20	
				$\bar{X}E_{c,s,12}$	1811	3,72 %	0,19	-20,23 %

Tabla 5.1: Datos de ciclos de carga sobre sub-probetas cúbicas ssP y valor de $E_{c,s}$

El mayor o menor valor de deformación está relacionado con la rama de ajuste de los transductores de desplazamiento al inicio del ensayo, como ya se indicaba en la figura 5.3 al comprobar el desplazamiento inicial anterior al primer escalón de precarga. Este es el motivo por el cual probetas con valores de deformación muy diferentes presentan módulos de elasticidad parecidos, como las sub-probetas cúbicas ssP-12.1.2 y ssP-12.2.1 donde los valores de deformación son 0,0021 y 0,0019 para la primera frente a 0,0042 y 0,0040 de la segunda, teniendo ambas el mismo valor de $E_{c,s}$. En otros casos la diferencia es aún mayor, pero la causa es la misma. En la figura 5.5 se muestran las gráficas de tensión-deformación de esas dos sub-probetas cúbicas durante los ciclos de carga. En la sub-figura 5.5(a) se puede ver como el escalón de precarga se alcanza para una deformación en torno a 0,0010, frente a los 0,0025 de la sub-probeta cúbica ssP-12.2.1 que aparece representada en la sub-figura 5.5(b). A partir de ese momento el comportamiento de ambos ensayos es muy parecido.

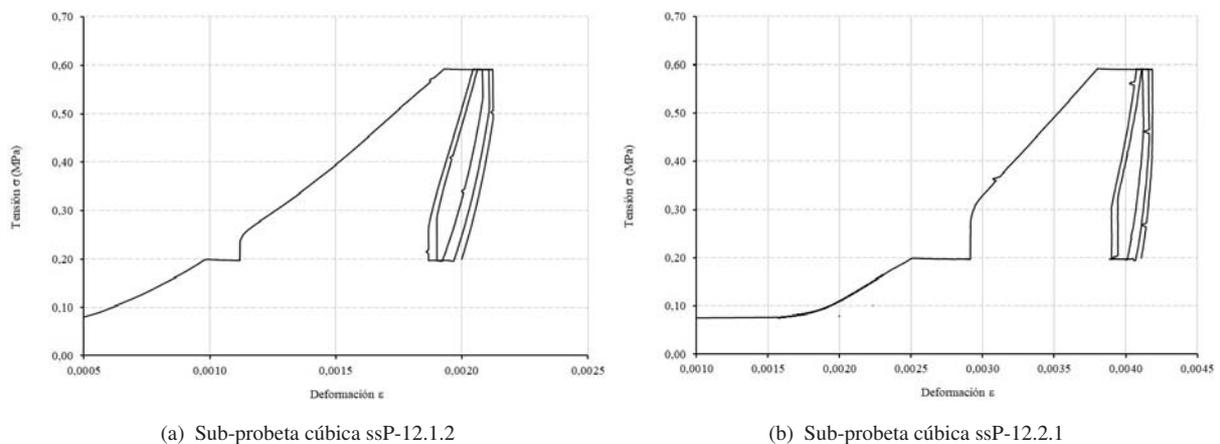


Figura 5.5: Gráficas de tensión-deformación durante los ciclos de carga en sub-probetas cúbicas ssP-12.1.2 y ssP-12.2.1

5.3. Resultados de ensayos a compresión sobre probetas cúbicas

El último ensayo realizado sobre las sub-probetas cúbicas ssP y las series cúbicas iniciales es el de rotura por compresión, a partir del cual se han obtenido los valores de resistencia máxima a compresión ($f_{c,max}$), el módulo de elasticidad en compresión (E_c) y el coeficiente de Poisson (ν_c). El proceso de rotura de las probetas sometidas a carga de compresión uniaxial comienza con una microfisuración en la zona de contacto entre los áridos y la matriz aglomerante. A medida que la carga aumenta se multiplica número de microfisuraciones a la vez que aumentan de tamaño hasta formar fisuras completas que hacen que la probeta quede rota (Mehta, 1986). En la figura 5.6 (Glücklich, 1968) se puede observar como el proceso de microfisuración del material de las probetas atraviesa varias fases en función del porcentaje de carga al que está sometido. Este motivo hace que la curva de la tensión-deformación se vaya inclinando a medida

que aumenta la carga aplicada, y por tanto estaría indicando una no-linealidad teórica del material, hecho que ya fue estudiado hace tiempo por autores como [Hsu *et al.* \(1963\)](#) o [Shah y Slate \(1968\)](#) entre otros. Este proceso de aparición y crecimiento de microfisuración hasta la rotura por compresión guarda una gran similitud con la mecánica de fractura por flexión descrita en el capítulo 6.

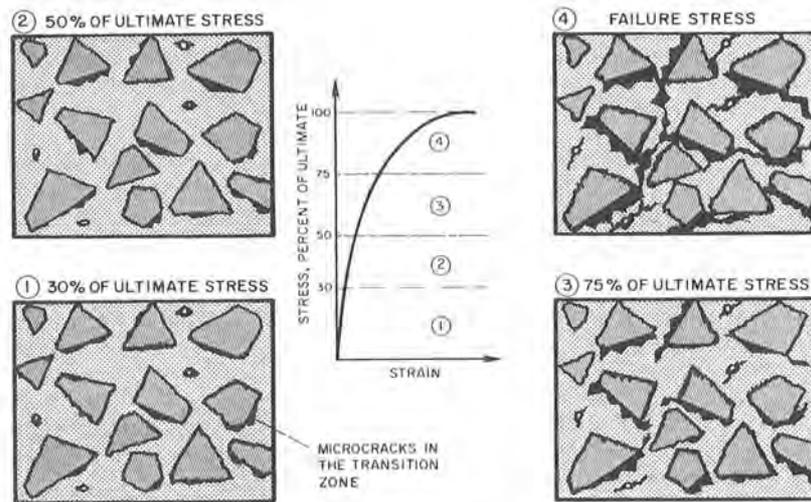


Figura 5.6: Representación gráfica del comportamiento del hormigón bajo compresión uniaxial ([Glucklich, 1968](#))

Este efecto se ha puesto claramente de manifiesto durante los ensayos sobre las probetas y sub-probetas cúbicas ssP, como se puede observar en la figura 5.7 y en la posterior tabla 5.2. En esta figura se representan las curvas de tensión-deformación de dos probetas, cúbica 4.1 y sub-probeta cúbica ssP-11.2.1, obtenidas a partir del desplazamiento medido con los transductores. Se observa como el efecto de no-linealidad es muy acusado, por lo que la determinación del módulo de elasticidad se establece como el secante en el 40 % de la carga máxima de compresión. Será también en ese punto en el que se determine el valor del coeficiente de Poisson.

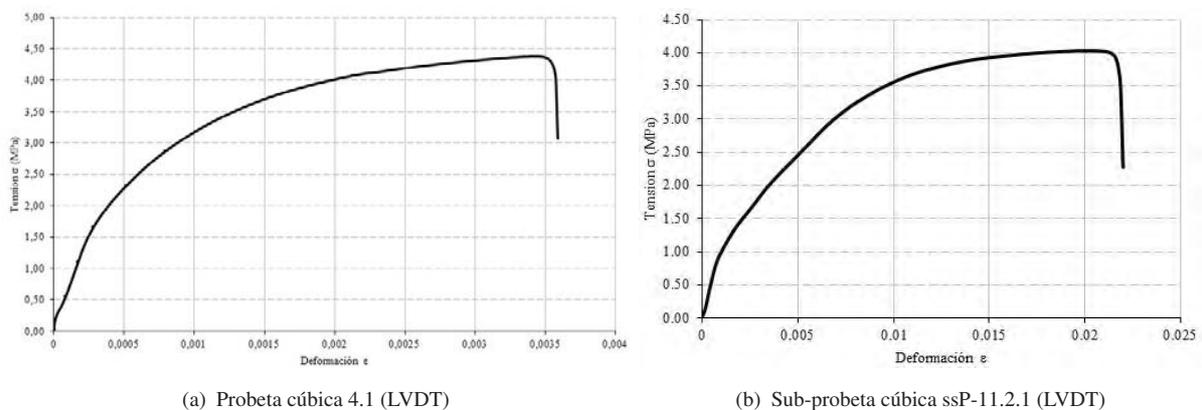


Figura 5.7: Gráficas de tensión-deformación de ensayos de compresión uniaxial sobre probeta cúbica 4.1 y sub-probeta cúbica ssP-11.2.1

Se debe recordar que en materiales heterogéneos como el tapial, serán el módulo de elasticidad de los componentes, las características de anclaje en la zona de contacto entre los áridos y la matriz aglomerante y la porosidad (densidad) los factores determinantes de su comportamiento elástico. Por tanto la degradación de la zona de contacto provoca la forma curva tan marcada, como se indicaba en la figura 5.6 y se observa en la 5.7. Por otro lado, al realizar el ensayo de rotura por compresión axial, los datos de las probetas que no han tenido una forma de rotura satisfactoria se han desestimado, ya que en algunas probetas han aparecido fisuras por tracción. El criterio de aceptación de probetas aparece en la figura 5.8, tomada de [UNE-EN:12390-3 \(2019\)](#). Así sólo aquellas probetas que presentan alguna de estas formas de rotura se han considerado en las tablas de resultados, desestimando el resto. En la figura 5.9 se muestran algunos ejemplos de roturas satisfactorias en las probetas.

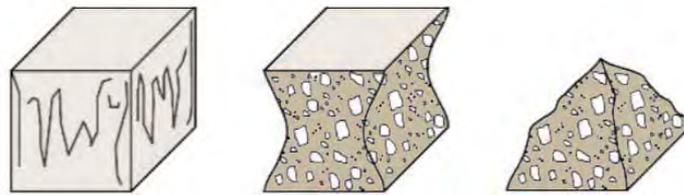


Figura 5.8: Criterio de aceptación de rotura con forma satisfactoria según [UNE-EN:12390-3 \(2019\)](#)

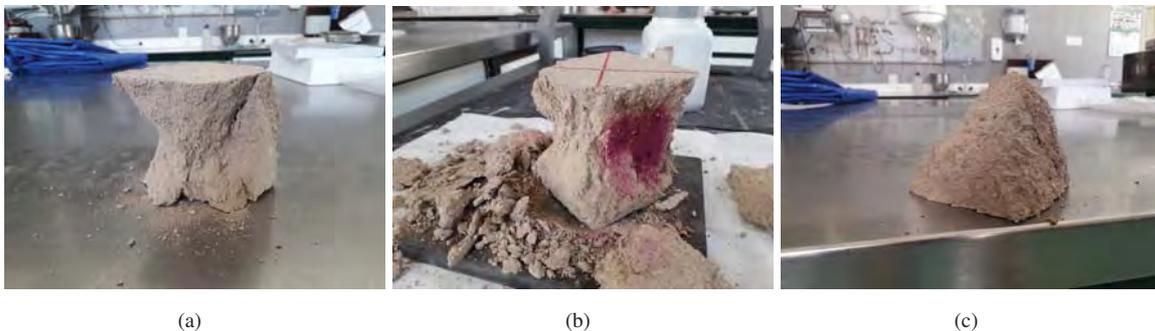


Figura 5.9: Roturas consideradas como satisfactorias en probetas de tapial

Los ensayos realizados han seguido las indicaciones que aparecen en la citada norma [UNE-EN:12390-3 \(2019\)](#), por la cual el valor de la tensión máxima de compresión se obtiene de la expresión:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (5.2)$$

Donde:

f_c = resistencia a compresión en MPa

F = carga máxima de rotura en N

A_c = área transversal de la probeta en mm^2 (UNE-EN:12390-1, 2014)

En la tabla 5.2 se resumen los datos de tensión máxima de rotura, módulo de elasticidad secante y coeficiente de Poisson de todas las series de probetas y sub-probetas cúbicas ssP de tapial ensayadas. Los datos pormenorizados de cada probeta se pueden consultar en el apéndice A

Sub-probetas	Ciclos de carga		Prensa			Probetas	Prensa		
	$E_{c,ssP-ciclos}$ (MPa)	ν	$E_{c,ssP-prensa}$ (MPa)	ν	f_c (MPa)		$E_{c,series-prensa}$ (MPa)	ν	f_c (MPa)
ssP-1	1943	0,21	1132	0,37	4,46	serie 1	5054	0,33	2,03
ssP-6	1766	0,28	561	0,33	3,53	serie 2	1076	0,37	2,47
ssP-7	1571	0,26	399	0,33	2,63	serie 4	4137	0,38	2,89
ssP-9	1839	0,22	661	0,26	3,90	serie 5	3569	0,34	2,51
ssP-10	1612	0,25	401	0,22	3,58	serie 6	2462	0,33	2,93
ssP-11	1967	0,28	1181	0,34	3,78	serie 7	4333	0,43	2,80
ssP-12	1811	0,19	1354	0,36	4,27	serie 8	2204	0,36	2,61
\bar{X}_{ssP}	1787	0,24	813	0,31	3,73	serie 9	307	0,12	2,10
						serie 10	178	0,20	2,65
						\bar{X}_{series}	2529	0,32	2,58

Tabla 5.2: Resumen de datos de probetas y sub-probetas cúbicas

Si se analizan los resultados mostrados por las sub-probetas cúbicas ssP se observa como los módulos de elasticidad obtenidos a partir de los ciclos de carga en cada sub-probeta presentan valores muy parecidos, volviendo a marcar la ssP-7 el menor de ellos. No se observan diferencias en función de la dosificación, obteniendo de todas ellas un valor medio de 1787 MPa, por lo que se puede entender que el procedimiento es válido en su aplicación al tapial. Si se compararan los datos de los ciclos de carga con los aportados por el ensayo de carga máxima a compresión se observa una disminución en el módulo de elasticidad. Hay que recordar que la comparación de los módulos se hace contra el módulo de elasticidad secante en el 40 % de la carga máxima, pudiendo variar el resultado en función del porcentaje estimado. Las sub-probetas ssP-7 y ssP-10 vuelven a marcar los menores valores, mientras que la disminución es menos acusada en ssP-1, ssP-11 y ssP-12, si bien llega a ser de un 25-40 %.

Se demuestra así que el efecto de microfisuración indicado en la figura 5.6 producido durante los ensayos de ciclos de carga han afectado severamente a varias de las sub-probetas cúbicas, produciendo un fenómeno de ablandamiento que en el caso del tapial es muy considerable. Las propias curvas que aparecen en la figura 5.7 indican ya una tendencia muy acusada al ablandamiento con un tramo de comportamiento plástico y dúctil muy acusado antes de llegar a su carga máxima de compresión.

Si se analizan los valores de módulo de elasticidad secante de las series de probetas cúbicas originales, probetas que no provienen de cortes de otras anteriores y que no se han sometido a ciclos de carga, vemos como su valor de módulo es superior a los obtenidos sobre las sub-probetas cúbicas. El valor medio de las nueve series es de 2591 MPa, si bien existen valores muy discordantes, pudiendo ser muy diversos los motivos de dicha discordancia. Si se eliminan esos valores que están fuera de rango, se obtiene un valor de módulo de elasticidad secante en torno a los 3262 - 3626 MPa, en función de las series que se descarten.

Respecto a los valores medios obtenidos de coeficiente de Poisson se observa que guardan cierta similitud entre ellos, con un menor valor para los obtenidos mediante ciclos de carga (0,24) frente a los obtenidos durante los ensayos de compresión uniaxial (0,31 - 0,32). Sólo se ha encontrado un valor discordante, en la serie 9 de las probetas cúbicas, serie que también ofrecía un dato anómalo de módulo de elasticidad secante.

El último de los datos analizados es la resistencia máxima a compresión, pudiendo ser este el dato que definiera de una forma general la capacidad del tapial, de igual forma a como se hace con el hormigón o con los bloques de tierra comprimida (UNE:41410-08, 2008). Como se puede observar en la tabla 5.2 los valores obtenidos guardan una buena relación entre ellos, sin que aparezcan valores muy dispares. Así, los datos de las series de probetas cúbicas se mueven en un rango entre los 2,10 MPa y los 2,93 MPa¹. La media de las series de probetas cúbicas es 2,58 MPa, pudiendo ser 2,64 MPa si se eliminan las series 9 y 10 que presentaban valores anteriores anómalos. La serie 11, probetas fabricadas con una densidad inferior como elemento de control de los valores a suficiente distancia, ofrece un valor de resistencia máxima a compresión media de 0,81 MPa, valor que queda dentro de lo esperado.

Las sub-probetas cúbicas ssP presentan un comportamiento parecido a las anteriores, con un rango de valores muy acotado y sin que aparezcan datos claramente discordantes. Así, con una media de 3,73 MPa, los valores oscilan entre un mínimo de 2,63 MPa y un máximo de 4,46 MPa. En estas sub-probetas cúbicas ssP los valores máximos de módulo de elasticidad secante, coeficiente de Poisson y resistencia máxima a compresión coinciden en las mismas tres, ssP-1, ssP-11 y ssP-12 (salvo puntualmente f_c en ssP-9), dato que puede ser significativo del comportamiento del material.

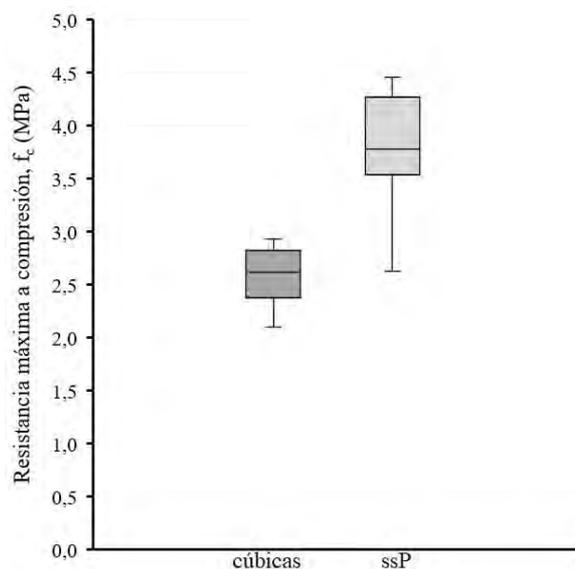


Figura 5.10: Valores de carga máxima de compresión en series de probetas cúbicas (cúbicas) y sub-probetas cúbicas (ssP)

En la figura 5.10 se muestra de forma gráfica la relación entre los valores de carga máxima

¹Los valores de la serie 1 se obtuvieron en un periodo de tiempo muy inferior al resto de probetas, ya que se utilizaron casi de forma exclusiva para conocer el proceso de carbonatación (capítulo 9)

de compresión de las series de probetas cúbicas y las sub-probetas cúbicas ssP, pudiendo ser la carbonatación el factor que provoca la diferencia entre ellos, aspecto que se tratará en el siguiente capítulo.

Capítulo 6

Ensayos de fractura en probetas de tapial

Los ensayos de fractura se realizaron en el Laboratorio de Estructuras de la ETS de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. Los ensayos proporcionan valores de energía de fractura, tensión máxima de tracción y la ley de ablandamiento, calculando posteriormente los datos de longitud característica y número de fragilidad, siendo éstos los parámetros que dan origen y controlan la propia mecánica de fractura.

Hay que recordar que el tapial existente en las estructuras patrimoniales presenta un estado fisurado en muchas ocasiones. Estas fisuraciones son susceptibles de avanzar ante cualquier excitación, por lo que conocer y desarrollar modelos de mecánica de fractura sobre el tapial podrá mejorar la capacidad de predecir su comportamiento, tanto por la aparición como por la evolución de las grietas existentes. La aplicación de la mecánica de fractura al tapial no ha sido aún desarrollado, siendo muy pocos aún los investigadores que han tratado de acercar el método a este material (Muzikova *et al.*, 2018).

La mecánica de fractura está ampliamente desarrollada para otros materiales como el hormigón, siendo Kaplan (1961) quien realizó los primeros estudios en este campo, mediante el desarrollo de la Mecánica de Fractura Elástica Lineal (MFEL). Por lo tanto, es en base a los sistemas aplicados al hormigón sobre los que se basarán los trabajos realizados en esta tesis, aplicados ahora al tapial, dada la gran analogía existente entre ellos. Los modelos lineales estudiados por Kaplan no se adaptan de forma satisfactoria a los resultados reales, por lo que se produce el posterior desarrollo hacia la mecánica de fractura no-lineal (Ngo y Scordelis, 1967), (Rashid, 1968), consiguiendo una mayor precisión en comparación con situaciones reales. Posteriormente Hillerborg *et al.* (1976), basándose en trabajos anteriores de Dugdale (1960) y Barenblatt (1962) sobre metales, desarrolló todo el sistema de aplicación de la mecánica de fractura al hormigón, creando los modelos de fisura que se utilizan en esta tesis.

6.1. Base teórica de la mecánica de fractura

Si se analiza el comportamiento de una probeta de hormigón en masa sometida a tracción, se observa que tiene un comportamiento cuasifrágil, presentando una curva de fuerza-desplazamiento como la indicada en la figura 6.1 (Hillerborg, 1985). En esa curva, denominada curva $P - \delta$, se observan varios estados que la probeta va alcanzando, desde el estado inicial (O) hasta la rotura completa al alcanzar el punto D. Entre estos dos puntos aparece una primera zona de comportamiento lineal (O-A) donde el material de la probeta responde al esfuerzo sin manifestar daños internos. Posteriormente, aparece un segundo tramo (A-B) en la que se mantiene sensiblemente el comportamiento lineal si bien se produce la aparición de las primeras microfisuras, presentando un contacto tortuoso entre ellas que provoca un endurecimiento por deformación (Shah *et al.*, 1995).

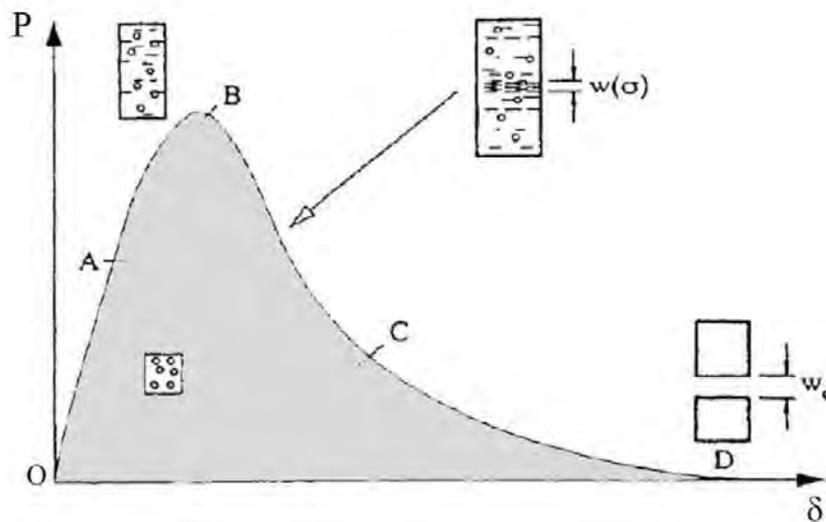


Figura 6.1: Curva de ablandamiento de un material cuasifrágil sometido a tracción. (Hillerborg, 1985)

La probeta alcanzará su pico de carga al llegar el punto B, denominándose todo el recorrido posterior hasta llegar al punto D como zona post-pico. En esa zona las fisuraciones comenzarán a crecer en número y tamaño, conectándose entre ellas para crear fisuras de mayor longitud (B-C) y provocando un ablandamiento progresivo en el material. Este progresivo aumento en el tamaño de las fisuras (C-D) llegará hasta un punto en el que se produzca la completa rotura de la probeta, alcanzado en el punto D. El área que queda encerrada bajo la curva $P - \delta$ representa la energía que ha sido necesaria incorporar al material de la probeta para su fractura completa (Cifuentes y Medina, 2013).

Será en el tramo de formación de las fisuraciones (tramo B-C-D) donde se produzca el ablandamiento del material y por tanto donde se centre el estudio de su comportamiento. De esa manera, mientras que el material se encuentra sometido a un esfuerzo que lo mantiene en ese tramo post-pico aparecerá una zona interna en él donde la fisuración comienza a producirse, una zona de ablandamiento de material denominada *zona de daño* o *zona de proceso de fractura* (ZPF). Esta zona puede aparecer ya en el tramo lineal (Veselj y Frantík, 2014), si bien su desarrollo más importante se dará en el tramo post-pico.

En la figura 6.2 (Shi, 2009) se puede ver un esquema, a modo de detalle ampliado, de lo que sucede en el borde de una fisura abierta de longitud a_0 . En ese borde aparece una zona indicada como ZPF, con una longitud característica, donde comenzarán a aparecer una serie de pequeñas fisuraciones en torno a los áridos y en relación al tamaño de éstos, que irán aumentando su espesor y longitud a la vez que se van conectando unas con otras hasta convertirse en parte de la fisura abierta, haciéndola avanzar. En ese avance, la ZPF se va desplazando por el material hasta su completa fisuración una vez recorrido todo el espesor, tal y como representa la curva post-pico.

La zona del material que queda incluida dentro de la ZPF habrá sufrido por tanto un ablandamiento, que se puede expresar mediante una disminución del módulo de elasticidad del material inicial, indicado como $E^* < E$. Aún así, mientras que el material se encuentre en esta zona será capaz de seguir soportando tracciones, capacidad que irá descendiendo desde el total, en el punto de transición entre la ZPF y el material inalterado (f_t), hasta desaparecer en el punto en el que la microfisuración llega a convertirse en una fisura completa (W_c).

Diversos autores (Wolinski *et al.*, 1987), (Karihaloo, 1995), (Bazant y Planas, 1997), indican que el tamaño y la forma de la ZPF depende de factores propios del material, de forma independiente del tamaño de la probeta o elemento estudiado. Estos factores propios serían el tamaño y la forma de los áridos que se encuentran en el material o el tipo y cantidad de estabilizante utilizado. Por tanto se puede indicar que el comportamiento post-pico del material viene representado por la ley de ablandamiento, que está a su vez vinculada con la aparición de microfisuras y el desarrollo y forma de la ZPF (Cifuentes y Medina, 2013).

La cantidad de energía necesaria para llevar a cabo este proceso de creación y desarrollo de la ZPF hasta la rotura completa del material será la *energía de fractura* (G_F). Cifuentes y Medina (2013), al trabajar sobre probetas de hormigón en masa, definen la energía de fractura como "la energía necesaria para la creación de una grieta de superficie unidad", indicando también que es un valor propio del material.

Además indican que la forma más directa de obtener la energía de fractura de un material

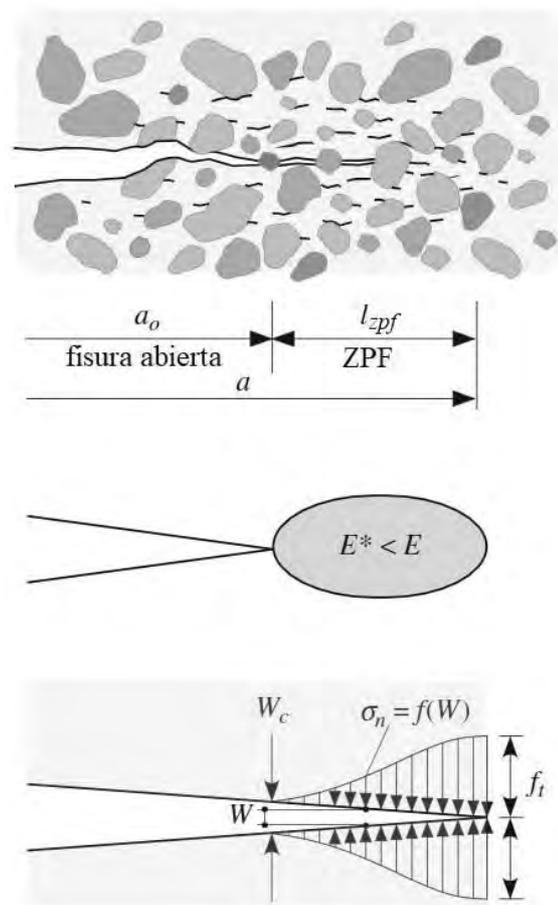


Figura 6.2: Esquema de detalle de la ZPF. (Shi, 2009)

será conociendo el valor del parámetro de *trabajo de fractura* (W_F), que se puede calcular a partir de las curvas $P - \delta$ en los ensayos realizados sobre probetas. Será también necesario conocer el *área de ligadura* (A_{lig}), área de la sección de la probeta que se mantiene en el plano de la entalladura.

De esa manera la energía de fractura se puede obtener mediante la expresión:

$$G_F = \frac{W_F}{A_{lig}} \quad (6.1)$$

La energía de fractura (G_F), junto con la resistencia a tracción (f_t) y el módulo de elasticidad longitudinal (E) serán las propiedades mecánicas que controlen el comportamiento del material en fractura. La primera de ellas se podrá obtener de la forma indicada anteriormente, mientras que las dos restantes pueden ser también obtenidas de las curvas $P - \delta$ en los mismos ensayos.

6.2. Metodología de ensayos a fractura sobre probetas

Son varios los tipos de ensayos que se pueden aplicar sobre probetas para obtener datos que permitan calcular la energía de fractura de un material, si bien la mayoría de autores utilizan dos tipos. Uno de ellos, denominado *wedge splitting test* (WST) provoca un esfuerzo de tracción sobre una probeta cúbica mediante la acción que una cuña transmite sobre dos rodillos ensamblados a dos abrazaderas situadas a ambos lados de la entalladura (figura 6.3).

Las abrazaderas se sitúan a ambos lados de la entalla, sobre una muesca longitudinal ejecutada en la cara superior de la probeta. Al descender la cuña por la acción de la prensa, su forma hace que los rodillos, y con ellos las abrazaderas, se vayan desplazando hacia el exterior haciendo que la entalla crezca longitudinalmente a lo largo de la probeta.

Todo el proceso debe ser controlado mediante un sistema de transductores que corrijan de forma constante el desplazamiento de la prensa. El método presenta varias desventajas a la hora de compensar el efecto del peso propio de las dos mitades de la probeta al fracturarse. Además el sistema de apoyo, único en el eje de la probeta, introduce una dificultad añadida al ensayo.

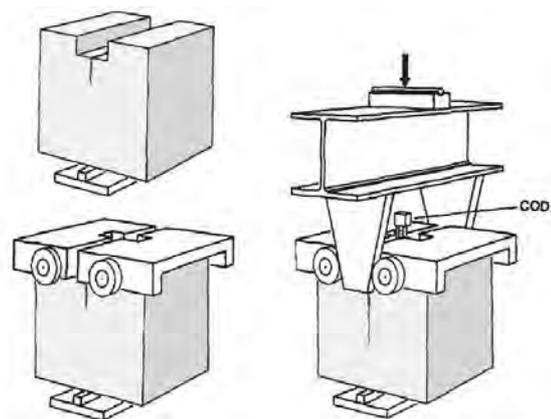


Figura 6.3: Esquema de ensayo WST. (Brühwiler y Wittmann, 1990)

El otro método de ensayo es el llamado *three points bending test* (3PBT) (figura 6.4), que ha sido el aplicado sobre las probetas utilizadas en esta tesis. El método consiste en someter una probeta prismática a un esfuerzo de flexión, mediante la aplicación de una carga en el centro de la misma. En el plano de aplicación de la carga se realiza una entalla, para controlar la zona de inicio de la fractura, midiendo tanto la apertura de la fractura como el desplazamiento vertical de la probeta mediante transductores.

El método empleado sigue las recomendaciones internacionales que aparecen en RILEM:TCM-85 (1985). En ese documento se indican cuestiones como las dimensiones de las probetas a ensayar, que estarán relacionadas de forma directa con el tamaño del árido, o la profundidad de la entalla a realizar. De igual modo el equipo a utilizar durante el ensayo también debe ser controlado para poder realizar un avance estable de la fisuración, utilizando unidades con control de desplazamiento (Guinea *et al.*, 1992).

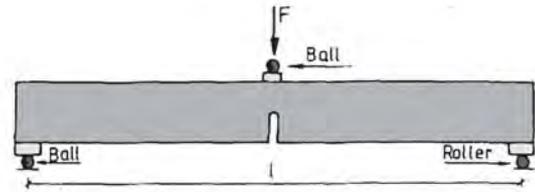


Figura 6.4: Esquema de ensayo 3PBT. (Hillerborg *et al.*, 1976)

Entre las indicaciones que aparecen en el documento de la asociación RILEM se indica que el desplazamiento en sentido vertical del punto medio de las probetas ensayadas debe ser medido de una forma continua, hasta alcanzar la rotura de las mismas. Además indica que el peso propio de la probeta o el peso de cualquier elemento incorporado al ensayo debe ser tenido en cuenta a la hora de calcular el trabajo de fractura. Ambas recomendaciones han sido observadas en las pruebas realizadas sobre las probetas de tapial, en las que además se ha incorporado el uso de un transductor de pinza colocado en la boca de la grieta (CMOD), para facilitar el control del ensayo.

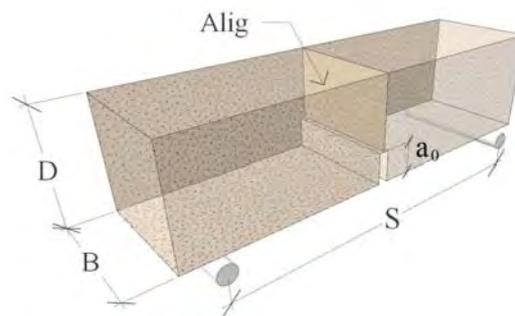


Figura 6.5: Datos geométricos de probetas para ensayos 3PBT según RILEM.

En el mismo documento se indica que el canto de las probetas debe ser superior a seis veces el tamaño máximo del árido y que la relación entre la longitud entre apoyos y el canto de la probeta se encuentre entre 4 y 8. En la figura 6.5 se indican cuales son las dimensiones que RILEM fija, así como la situación del área de ligadura (A_{lig}). En el caso de los ensayos realizados en esta tesis las medidas corresponderían a:

$$D = 100mm; B = 100mm; S = 400mm$$

con una longitud total de las probetas de 440 mm. El tamaño máximo de árido es de 10 mm por lo que las probetas cumplen con todas las indicaciones que aparecen en el documento de RILEM. La única modificación introducida durante el estudio es la profundidad de entalla a_0 , que según RILEM debe llegar hasta 1/2 del canto de la probeta si bien por temor a una rotura súbita de las probetas de tapial se ha limitado a 1/3 de la misma, con una anchura de 5 mm.

En la tabla 6.1 aparecen los datos geométricos de sección de las probetas, junto a la profundidad de entalla y el área de ligadura resultante. La notación que se ha estado usando durante la tesis utiliza la letra h para referirse al canto o altura de las probetas, mientras que RILEM utiliza la letra D . Se mantiene el uso de h para poder comparar los datos de los resultados anteriores.

La probeta P-4 sufrió una rotura durante la ejecución de la entalladura, por lo que no sus datos no aparecen en la tabla. A este respecto se indica que, como se verá posteriormente en el apartado 8.3 del capítulo 8, algunas probetas presentan un comportamiento anómalo, incidiendo de forma particular en la laminación de la probeta P-5. La entalla se realiza en una mesa cortadora de probetas, refrigerada con agua.

En la figura 6.6 se pueden comprobar las dimensiones de la entalla realizada a la probeta P-2, con una profundidad de 20 mm (a) y un espesor de 5 mm (b), obligado este último por el espesor del disco de corte. En este caso la entalla se redujo a 1/5 del canto, ante el temor de dejar las probetas excesivamente debilitadas. Esta decisión derivaría en una serie de problemas que posteriormente harían fracasar el ensayo sobre esa probeta.

Así, como se puede ver en la imagen (c) de la misma figura, la profundidad de la entalla coincidió con una de las tongadas, produciendo una fisura longitudinal poco tiempo después del inicio del ensayo de fractura. En la imagen (d) se aprecia como la fisura ha avanzado por el plano de contacto entre las tongadas, provocando un despegue entre ellas y por tanto el error en el ensayo.

Posteriormente todas las probetas volvieron a ser entalladas a una profundidad de 1/3 del canto, ya que el primer ensayo realizado sobre la probeta P-1 fue perfectamente satisfactorio. Aún así, el ensayo sobre la probeta P-5 puso de manifiesto un problema de laminación que existía en la misma, dando un resultado erróneo durante la toma de datos. Las curvas $P-\delta$ de las 11 probetas ensayadas se pueden consultar en el apéndice B.

Probeta	Dosificación	Dimensiones (mm)		a_0 (mm)	A_{lig} (mm ²)
		b	h		
P-1	3:1	101,10	104,80	35	7057
P-2	3:1	101,18	103,01	20	8399
P-3	3:1	102,00	102,48	37	6679
P-4	3:1	101,50	105,80	-	-
P-5	3:1	101,28	105,45	35	7135
P-6	3:1	101,75	103,12	32	7236
P-7	4:1	101,25	104,16	34	7104
P-8	4:1	101,08	103,26	34	7001
P-9	4:1	101,16	105,80	34	7263
P-10	4:1	101,62	101,24	33	6935
P-11	4:1	101,45	102,91	34	6991
P-12	4:1	101,32	102,31	34	6921

Tabla 6.1: Profundidad de entalla y área de ligadura en probetas de tapial



Figura 6.6: Dimensiones de entalla en probeta P-2 y su posterior rotura durante el ensayo

6.3. Análisis de resultados obtenidos de ensayos 3PBT sobre probetas de tapial

Al igual que se hará al analizar los datos de los ensayos FFRF también en este caso de ensayos 3PBT se analizará el resultado en una probeta como modelo explicativo del trabajo realizado. Posteriormente se analizarán también los casos atípicos, antes de mostrar los resultados finales y proseguir con los datos definitivos.

En este caso la probeta elegida para ser analizada es la P-1, cuya curva P- δ se muestra en la figura 6.7. En la imagen se marcan los puntos de los distintos tramos que se distinguen en la curva. Se aprecian con claridad las zonas pre-pico y post-pico, con una geometría que se acerca mucho, formalmente, a las gráficas obtenidas sobre probetas de hormigón, por lo que se entiende que la analogía entre el tapial y el hormigón en masa sigue siendo aceptable. El primero de esos tramos, de un marcado carácter lineal entre O y A es seguido por una zona de comportamiento prácticamente lineal en el que comienza a aparecer un endurecimiento por deformación al acercarse al punto B.

A partir de ese punto B, punto pico que marca la máxima tensión a tracción de la probeta, se comienza a formar una ZPF en la entalla, con el consiguiente ablandamiento del material en esa zona. Al continuar el ensayo las fisuraciones avanzan, y se convierten en una grieta visible, desplazando la ZPF por el canto de la probeta. Todo ese proceso se produce en el tramo post-pico, entre los puntos B y C, principalmente, acelerándose el proceso en el tramo final entre C y D.

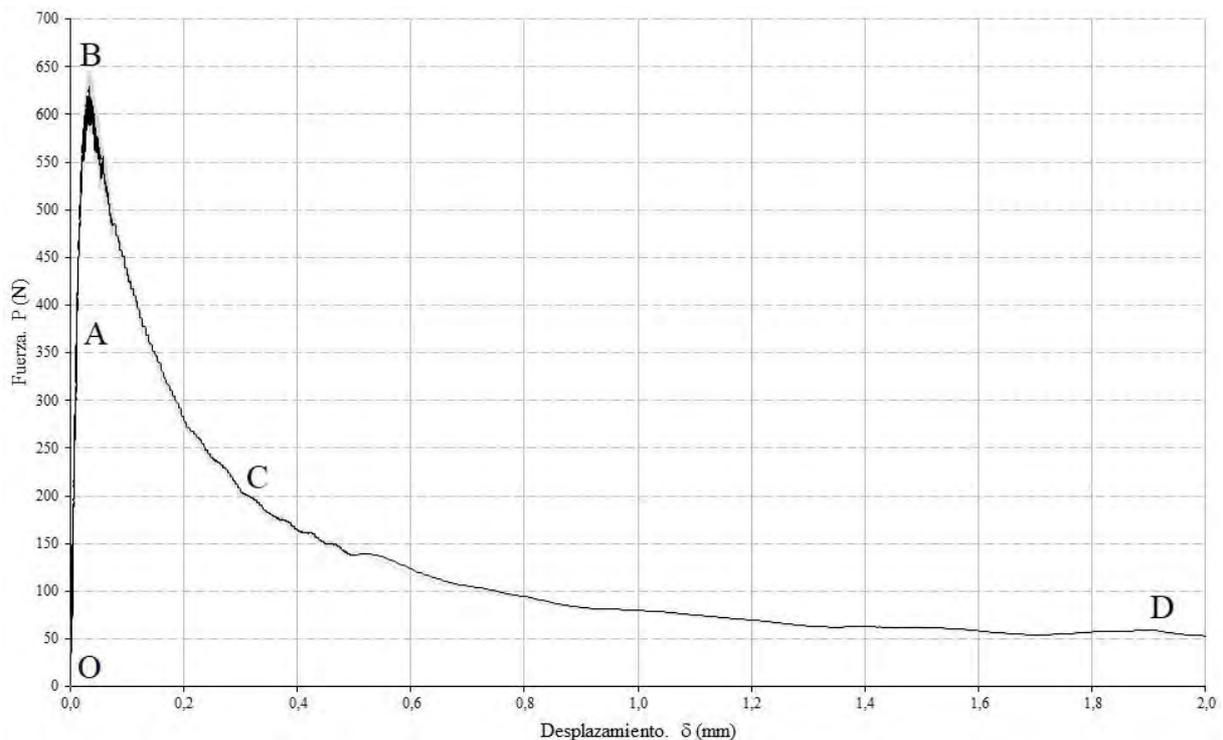


Figura 6.7: Curva P- δ de probeta P-1



Figura 6.8: Imágenes de ensayo 3PBT sobre probeta P-1

En la figura 6.8 se muestran imágenes del proceso de ejecución del ensayo. Se coloca un transductor de pinza en la boca de la grieta (a), con el cual se puede medir directamente la apertura que se irá produciendo en la misma durante el ensayo (CMOD). Los datos obtenidos por este transductor permiten crear las curvas $P-\delta$.

En la subfigura (b) se puede observar el montaje completo del ensayo, en el cual se aprecian los sistemas elásticos instalados para soportar el peso de las dos partes en las que va a quedar dividida la probeta. De esa manera se evita tener que incorporar la corrección por la acción del peso propio. También aparece el transductor LVDT colocado para controlar el desplazamiento vertical de la probeta. Este transductor se monta sobre una pequeña subestructura metálica que se apoya fuera de la zona de influencia del ensayo, para evitar la participación de su peso en el ensayo, y por tanto, tener que introducir correcciones posteriores, al igual que se hace con el peso propio de la probeta. La subestructura mantiene la posición vertical del transductor durante el ensayo mediante la posibilidad de giro libre que ofrecen sus puntos de apoyo.

La subfigura (c) muestra el avance de la fisura en la probeta, con un trazado casi perfectamente vertical en el que las interfases de las diferentes tongadas con las que se construye la probeta no han interferido desviando la fisura, a diferencia de lo que se podía observar al hacer el ensayo sobre la probeta 2 (figura 6.6c). La revisión del correcto trazado de la fisura junto con la obtención de una gráfica $P-\delta$ también correcta indica que el ensayo ha resultado satisfactorio.

Finalmente se revisa el plano de fisuración resultante tras el ensayo (d) donde se aprecia que no se han producido roturas internas que hayan aumentado el recorrido de la fisura. Un plano de rotura tortuoso o muy irregular significaría un aumento en el tamaño del área de ligadura.

Como se ha comentado anteriormente, todas las probetas ensayadas han manifestado un comportamiento correcto, ofreciendo curvas $P-\delta$ formalmente parecidas y valores coherentes (ver apéndice B), salvo las probetas P-2 y P-5. Merece la pena que se analicen sus curvas ya que, aunque ambas responden a un fallo durante el ensayo, cada una de ellas indica un motivo distinto y una reacción diferente de las probetas ante la sollicitación a flexión.

Como datos de partida se puede indicar que en la probeta 2 no se había detectado ningún comportamiento extraño al realizar los ensayos END anteriores, por lo que el fracaso durante el ensayo se puede achacar a la cercanía de la profundidad de entalla y el plano de la tongada. Es muy posible que la interfase entre las dos tongadas cercanas al fondo de la entalla tuviera algún tipo de debilidad, siendo el ensayo lo que ha terminado poniéndolo de manifiesto. Por otro lado, era ya conocido que la probeta P-5 presentaba un comportamiento irregular y que éste parecía responder a una laminación en uno de los planos de las tongadas de construcción.

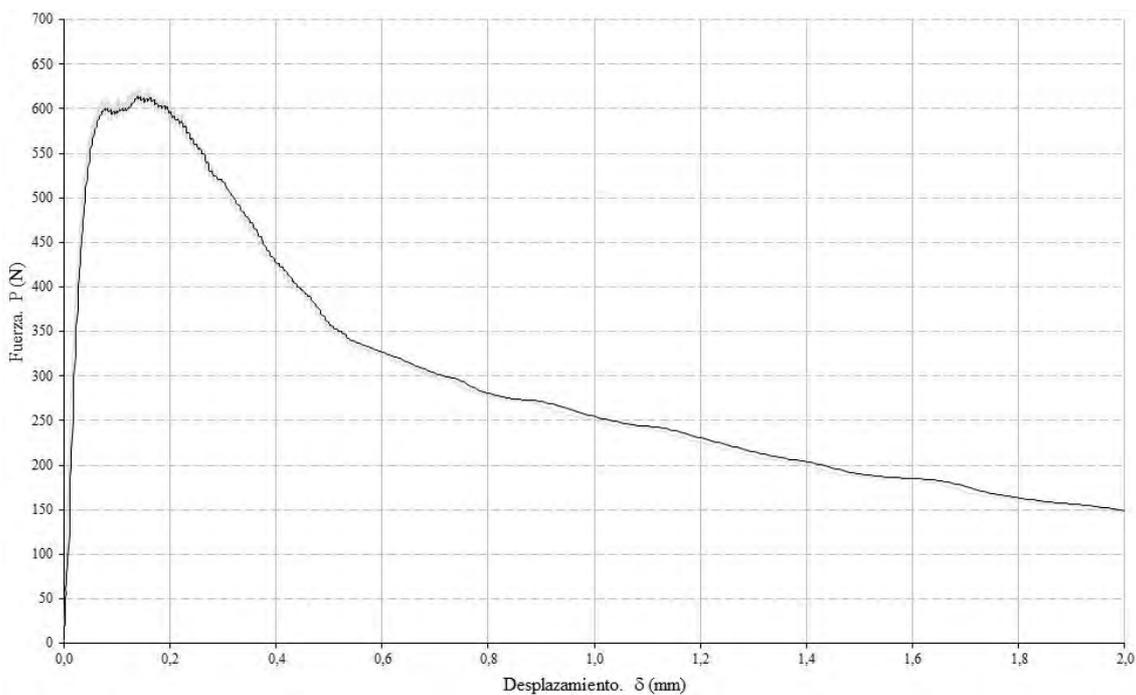


Figura 6.9: Curva $P-\delta$ de probeta P-2

En la figura 6.9 se representa la curva $P-\delta$ de la probeta P-2, en la que se puede ver con claridad como tras un primer tramo con un comportamiento lineal dentro de lo esperado, se produce una rápida deformación justo antes de alcanzar el máximo valor de tracción. Este salto en la curva, representado como un escalón, corresponde con una rotura súbita del material, atribuible a una laminación en la probeta. Aún así, como se puede observar, el valor pico es muy similar al alcanzado por la probeta P-1, en torno a los 600 N.

La zona de curva post-pico muestra un gran desplazamiento para un menor descenso en la

carga, lo que puede indicar que la probeta estaría presentando un comportamiento más dúctil, que señalaría a su laminación interior y una posible ramificación de la fisuración. De hecho en la figura 6.6 (c) se aprecia un desplazamiento lateral de la fisuración seguido de un tramo vertical desde el que se derivan dos ramas principales de fisura.

Por su parte, la curva $P-\delta$ de la probeta P-5, representada en la figura 6.10, muestra un comportamiento aún más irregular desde el principio. El tramo pre-pico no muestra la linealidad del resto de probetas, con una deformación inicial que puede deberse a los efectos de acople entre las distintas tongadas ante el esfuerzo a que se someten durante el ensayo. Posteriormente, antes de alcanzar el valor máximo, aparecen una serie de saltos que vuelven a ser interpretados como fisuraciones súbitas provocadas por un deslizamiento entre las tongadas. El valor de pico es muy inferior al del resto de las probetas (~ 200 N), y la curva post-pico responde al comportamiento de un material con un ablandamiento muy rápido, de mayor ductilidad. Finalmente, la probeta manifestó una fisura longitudinal que hizo fracasar y finalizar el ensayo. Como se verá más adelante en el capítulo 8, el ensayo FFRF indicará también algún tipo de anomalía en esta probeta.

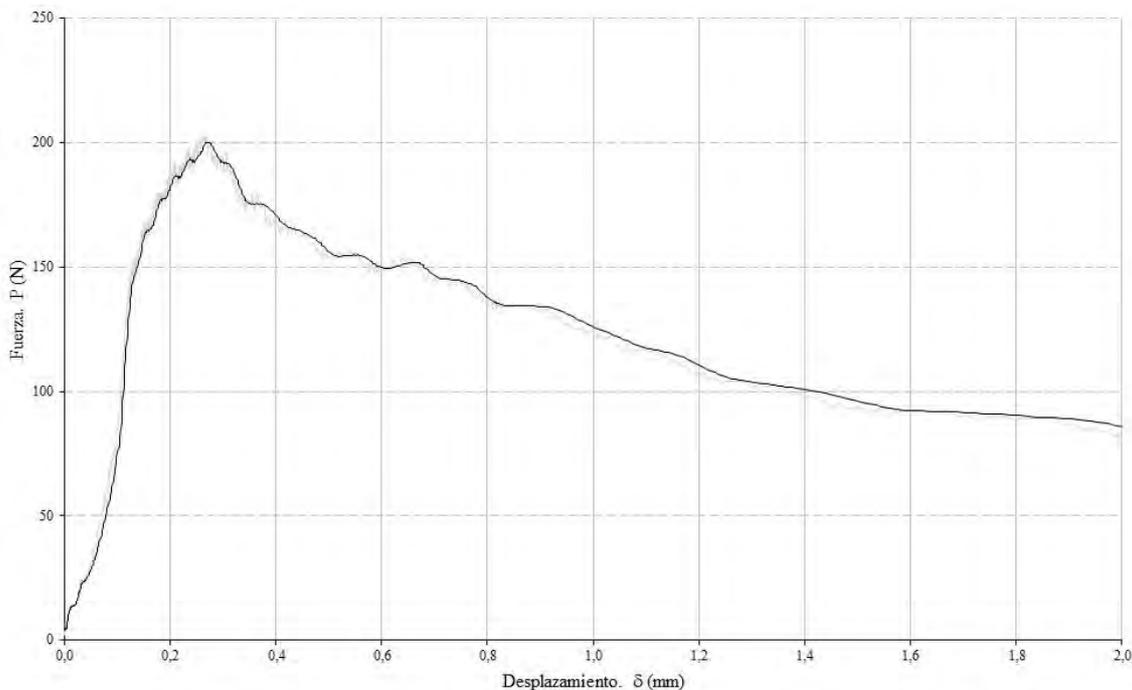


Figura 6.10: Curva $P-\delta$ de probeta P-5

El resto de probetas mantuvo un comportamiento muy satisfactorio durante los ensayos, con valores coherentes y curvas $P-\delta$ con un desarrollo dentro de lo esperado. En la tabla 6.2 se indican el área calculada bajo la curva, correspondiendo con el valor del trabajo de fractura (W_F). Una vez calculado este parámetro y conocido el área de ligadura (A_{lig}) se han calculado los valores de la energía de fractura a partir de la expresión (6.1). En la misma tabla aparecen también los valores medios diferenciados por dosificaciones y la desviación de cada uno de los valores de las probetas sobre la media.

La probeta P-8, que hasta el momento no había dado indicios de un comportamiento di-

Probeta	Dosificación	W_F (Nm)	$desv. W_F$ %	A_{lig} (mm ²)	G_F (N/m)	$desv. G_F$ %
P-1	3:1	0,215	-9,15	7057	30,47	-10,25
P-2	3:1	-	-	8399	-	-
P-3	3:1	0,257	8,59	6679	38,48	13,36
P-4	3:1	-	-	-	-	-
P-5	3:1	-	-	7135	-	-
P-6	3:1	0,238	0,56	7236	32,89	-3,11
	media	0,237			33,95	
P-7	4:1	0,180	10,02	7104	25,34	8,98
P-8*	4:1	0,083	-	7001	11,86	-
P-9	4:1	0,148	-9,54	7263	20,38	-12,36
P-10	4:1	0,152	-7,09	6935	21,92	-5,72
P-11	4:1	0,153	-6,48	6991	21,89	-5,87
P-12	4:1	0,183	13,08	6921	26,73	14,97
	media	0,164			23,25	

Tabla 6.2: Valores de trabajo y energía de fractura en probetas de tapial

ferente al resto de probetas, presenta un valor de trabajo de fractura muy bajo (0,083 Nm), lo que significa que está en torno al un 50 % por debajo de la media del resto de probetas de su misma dosificación. Lógicamente, este dato hace que el valor de su energía de fractura (11,86 N/m) esté también un 50 % por debajo de la media. Es por este motivo por el que la probeta P-8 pasa a ser considerada como un caso anómalo, razón por la que sus resultados no se tendrán en cuenta a partir de este momento.

Los datos de la tabla 6.2 ponen de manifiesto una clara diferencia en el comportamiento de las probetas en función de la dosificación. Así, el valor medio del trabajo de fractura para las probetas de dosificación 3:1 es de $W_{F,3:1}=0,273$ Nm, mientras que para las probetas fabricadas con una proporción de 4:1 es de $W_{F,4:1}=0,164$ Nm. Esto supone una diferencia de 0,109 Nm, que se traduce en un incremento aproximado del 66,4 %. Algo similar ocurre con los valores finales de la energía de fractura, donde para la dosificación 3:1 el valor medio es $G_{F,3:1}=33,95$ N/m mientras que la dosificación 4:1 desciende hasta los $G_{F,4:1}=23,25$ N/m, lo que significa en una diferencia en torno al 46 %.

Dentro de cada dosificación se obtienen valores muy parecidos, con desviaciones en torno a ± 10 % en los resultados de trabajo de fractura en todas las probetas y ± 15 % en los correspondientes a energía de fractura. Así, si se revisan los datos de las desviaciones de forma cuantitativa se observa que en el trabajo de fractura la desviación estaría entre el $\pm 0,021$ Nm para la dosificación 3:1 y el $\pm 0,018$ Nm para la dosificación 4:1. Si se procede de la misma manera sobre los valores de energía de fractura las variaciones serían de +4,53 N/m a -3,48 N/m para la dosificación 3:1 y de +3,48 N/m a -2,89 N/m para la dosificación 4:1. En cualquiera de los casos las variaciones se pueden considerar como poco significativas para un material de tapial ejecutado a mano con técnicas tradicionales.

Manteniendo la comparación con el comportamiento del hormigón en masa, se comprueba que el valor de energía de fractura G_F para probetas de hormigón en masa de un tamaño similar a las utilizadas en esta tesis estaría en torno a los 100-150 N/m según los trabajos consultados de Brameshuber y Hilsdorf (1990), Guinea (1990) y Mihashi y Leite (2004). Esto supondría que

las probetas de tapial alcanzarían valores entre $1/3$ y $1/4$ de los valores propios del hormigón en masa.

6.4. Leyes de ablandamiento de las probetas de tapial

Una vez que la relación entre el comportamiento del tapial y el hormigón en masa queda nuevamente demostrado y en función del *modelo de grieta discreta* descrito por [Hillerborg et al. \(1976\)](#), se ha obtenido la ley de tensiones cohesivas en el vértice de la fisura, mediante el denominado *modelo de bisagra* ([Cifuentes et al., 2018](#)). El modelo de grieta discreta incorpora los conceptos de trabajo de fractura (visto anteriormente) y de longitud característica, sobre el que se incidirá en el siguiente apartado. El modelo supuso un gran avance en el conocimiento del comportamiento a fractura de materiales cuasi-frágiles, siendo uno de los modelos con un uso más extendido ([Roesler et al., 2007](#)), ([Stang et al., 2007](#)), ([Cifuentes y Medina, 2013](#)).

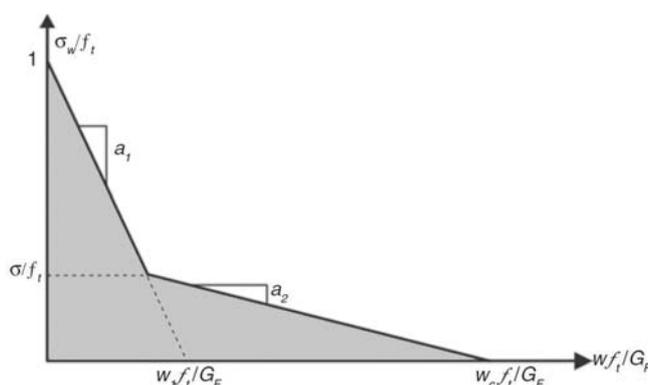


Figura 6.11: Ley de ablandamiento bi-lineal. ([Cifuentes et al., 2018](#))

La estimación del comportamiento del tapial en su fase de ablandamiento por efecto de la tracción se realiza mediante una ley constitutiva, que pone en relación la tensión (σ) y la apertura de la fisura (w). Con estos dos parámetros se pueden ir estimando la formación y desarrollo de la ZPF en la probeta. La ley de ablandamiento propuesta en el estudio de las probetas del tapial es bi-lineal (figura 6.11), siendo la ley que más autores utilizan en sus trabajos sobre hormigón. En la figura 6.12 se muestra, a modo de ejemplo, el ajuste obtenido para la probeta P-6, y su comparación con la ley bi-lineal ajustada, donde se observa un acoplamiento muy alto entre la curva obtenida del ensayo y la teórica.

En la tabla 6.3 se pueden ver los datos obtenidos de carga y tensión máximas a tracción sobre las probetas, así como los valores de a_1 y a_2 que controlan las pendientes de la curva de ablandamiento, según se indica en la figura 6.11. Los datos se han obtenido mediante un ajuste de mínimos cuadrados realizado con el programa Matlab, determinando los valores de la curva de ablandamiento a partir de la curva P-CMOD experimental. El cálculo realizado utiliza el código de Matlab que aparece en la tesis de [Østergaard \(2003\)](#).

La revisión de los resultados obtenidos muestra nuevamente la influencia que la dosificación de las probetas tiene en los valores de la ley de ablandamiento, con un comportamiento análogo

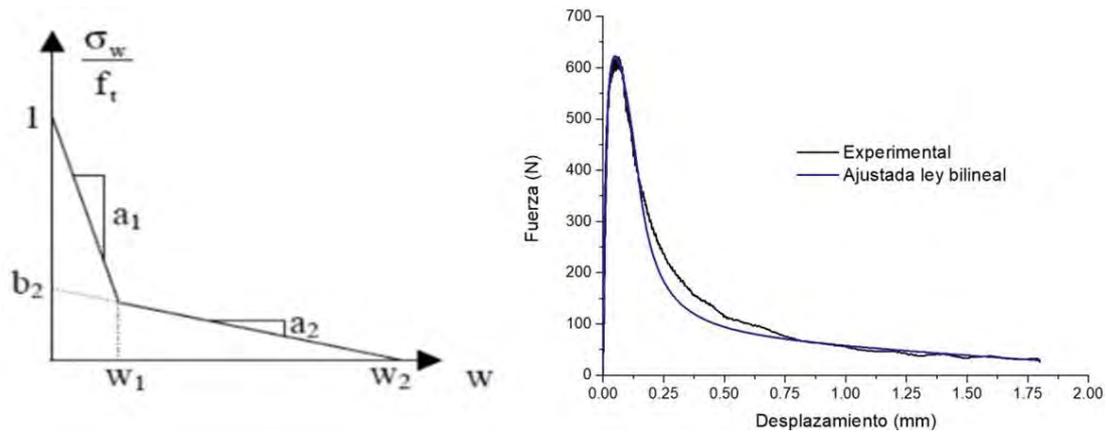


Figura 6.12: Aproximación de curva tensión-fisuración a un modelo bilineal (Østergaard, 2003) y comparación entre curva P- δ experimental y ley bilineal ajustada para la probeta P-6

Probeta	G_F (N/m)	f_t (MPa)	$desv. f_t$ %	σ_1 (MPa)	$desv. \sigma_1$ %	a_1 (mm^{-1})	$desv. a_1$ %	a_2 (mm^{-1})	$desv. a_2$ %
P-1 (3:1)	30,47	0,50	2,74	0,06	5,88	12	9,09	0,041	-20,65
P-3 (3:1)	38,48	0,50	2,74	0,05	-11,76	11	0,00	0,047	-9,03
P-6 (3:1)	32,89	0,46	-5,48	0,06	5,88	10	-9,09	0,067	29,68
media	0,487	0,057	11	0,052					
P-7 (4:1)	25,34	0,35	-20,81	0,05	0,00	12	-16,67	0,060	14,50
P-9 (4:1)	20,38	0,45	1,81	0,05	0,00	15	4,17	0,058	10,69
P-10 (4:1)	21,92	0,39	-11,76	0,05	0,00	15	4,17	0,060	14,50
P-11 (4:1)	21,89	0,46	4,07	0,05	0,00	15	4,17	0,042	-19,85
P-12 (4:1)	26,73	0,56	26,70	0,05	0,00	15	4,17	0,042	-19,85
media	0,442	0,050	14	0,052					

Tabla 6.3: Valores de ablandamiento según curva bi-lineal para probetas de tapial

al que presentaba la energía de fractura, visto en el apartado anterior. Así, como se puede ver en la tabla 6.3, los valores medios de resistencia a tracción de las probetas con dosificación 3:1 alcanzan valores de $f_{t,3:1} = 0,487$ MPa con una desviación de máxima del 5,48 %, mientras que para la dosificación 4:1 los valores disminuyen hasta $f_{t,4:1} = 0,442$ MPa con una desviación en torno a $\pm 25,00$ %. Estos valores suponen un incremento en la resistencia a tracción de un 10,18 % en las probetas con una mayor cantidad de cal en su dosificación.

Este comportamiento también está en consonancia con la diferencia que se obtiene de la pendiente inicial de la ley cohesiva bilineal, indicado por el valor de a_1 . Una mayor pendiente en este tramo significa una menor área y por tanto quedaría relacionado con un menor valor de energía de fractura. Los valores de este tramo para la dosificación 3:1 llegan a $a_{1,3:1} = 11 \text{ mm}^{-1}$ con una desviación en torno a un $\pm 9,00$ %, mientras que para la dosificación 4:1 la pendiente aumenta hasta $a_{1,4:1} = 14 \text{ mm}^{-1}$ con una desviación de entre el +4 % y el -16,67 %. El parámetro a_2 , que gobierna el segundo tramo de la curva de ablandamiento presenta el mismo valor medio para ambas dosificaciones.

A partir de los datos obtenidos se puede observar como los mayores valores de energía de fractura están en relación con valores también mayores de resistencia a tracción, según un

comportamiento esperado en este tipo de materiales. De igual manera ambos parámetros están relacionados con la mayor o menor cantidad de estabilizante utilizado, que a su vez influye en el tamaño de la ZPF, como se verá más adelante.

6.5. Obtención del módulo de elasticidad a partir de curvas P-CMOD

Como se ha indicado previamente, el tramo inicial de la curva $P-\delta$ presenta un claro comportamiento lineal, similar al que se observa en los ensayos de compresión sobre probetas. En esos ensayos, la forma habitual de determinar el módulo de elasticidad es mediante la obtención del módulo secante que se corresponde con la tensión en el 40 % de la carga máxima de compresión.

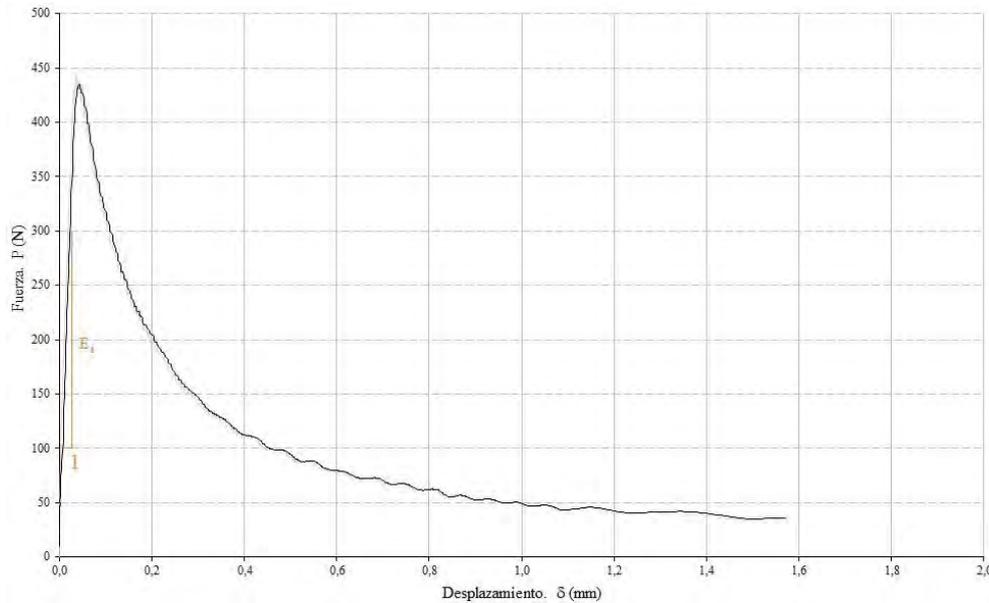


Figura 6.13: Representación del valor E_i sobre la curva P-CMOD de la probeta P-7

Existen varias formulaciones para estimar el valor del módulo de elasticidad a partir de los datos obtenidos en el ensayo de 3PBT, si bien en este trabajo de tesis se van a calcular esos valores mediante el modelo de los dos parámetros desarrollado por [Jenq y Shah \(1985\)](#), ya que se dispone de las curvas P-CMOD de los ensayos realizados sobre las probetas. El modelo propuesto por estos autores relaciona la pendiente del tramo O-A de las curvas P-CMOD (figura 6.13), a la que denominan E_i , con el módulo de elasticidad E mediante la expresión:

$$E = \frac{6E_i S a_0}{B D^2} V_1(\alpha) \quad (6.2)$$

Todos los valores geométricos de la expresión (6.2) son conocidos, mientras que el valor

de $\alpha = a_0/D$ es el valor relativo de la profundidad de entalla. Por último $V_1(\alpha)$ es un factor corrector adimensional que se obtiene de:

$$V_1(\alpha) = 0,8 - 1,7\alpha + 2,4\alpha^2 + \frac{0,66}{(1-\alpha^2)} + \frac{4D}{S}(-0,04 - 0,58\alpha + 1,47\alpha^2 - 2,04\alpha^3)$$

En la tabla 6.4 aparecen los valores calculados de módulo de elasticidad a partir de la expresión (6.2) y su comparación con los valores calculados mediante el uso de los END que aparecen en los restantes capítulos. Se utiliza la notación E_f para referirse al módulo de elasticidad calculado a partir de los datos de fractura. El valor de módulo de elasticidad estático obtenido de los ensayos de UPV (capítulo 7) se ha estimado como el 85 % del valor dinámico, siendo esta la relación obtenida para los valores de los ensayos FFRF (capítulo 8).

En la citada tabla se observa como los valores obtenidos con la expresión (6.2) son mucho más bajos que los obtenidos mediante los dos métodos no destructivos obtenidos mediante los dos métodos no destructivos que se muestran en los capítulos 7 y 8. Si se mantiene la tendencia de la probeta P-7 como el menor de los valores en los tres casos y de la probeta P-12 el mayor. Esta discordancia de valores será discutida una vez que se analicen todos los resultados obtenidos en el capítulo 11 mientras que ahora se aportan datos de comparan los valores obtenidos en cada probeta con los ensayos END realizados.

Probeta	Jenq y Shah (1985)		FFRF		UPV	
	E_i (N/mm)	E_f (MPa)	$E_{s-transv}$ (MPa)	E_{s-long} (MPa)	$E_{din-UPV}$ (MPa)	E_{s-UPV} (MPa)
P-1 (3:1)	31158	2569	6849	6579	5895	5011
P-3 (3:1)	26471	2415	5922	6010	5092	4328
P-6 (3:1)	25120	1953	6404	5884	5385	4577
media		2312	6392	6158		4639
P-7 (4:1)	12848	1040	5219	5404	4673	3972
P-9 (4:1)	34661	2715	6587	6696	4803	4083
P-10 (4:1)	30392	2528	6402	6259	5851	4973
P-11 (4:1)	20109	1668	6130	6233	5411	4599
P-12 (4:1)	36992	3112	7026	6761	6117	5199
media		2217	6273	6270		4565

Tabla 6.4: Valores de módulo de elasticidad en función del método utilizado

En la figura 6.14 se puede observar la relación que existe entre los datos, donde se muestra claramente el menor valor de los datos de la caja relativa a la expresión de Jenq y Shah (1985). Si se analizan los datos obtenidos según (6.2) en función de las dosificaciones empleadas se observa que apenas existe una diferencia del 4,82 % entre ellas, valor que, si bien es algo superior al obtenido mediante los END, se puede entender igualmente como prescindible.

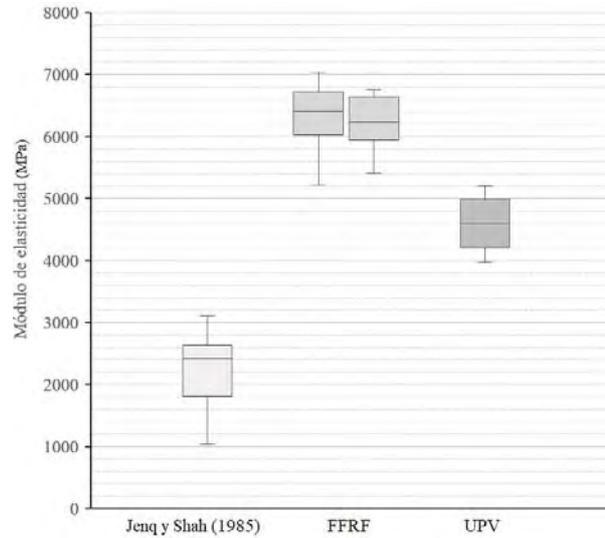


Figura 6.14: Comparación de resultados de módulo de elasticidad en función del método utilizado

6.6. Longitud característica del tapial de las probetas

Un parámetro muy interesante para conocer el comportamiento del material a fractura es la *longitud característica*. Este parámetro fue desarrollado por Hillerborg *et al.* (1976) y en él se relacionan la energía de fractura G_F , la resistencia a tracción f_t y el módulo de elasticidad E . Los tres parámetros quedarían entonces relacionados mediante la expresión:

$$l_{ch} = \frac{G_F E}{f_t^2} \quad (6.3)$$

La obtención de este parámetro de longitud característica se vuelve muy importante desde el momento en el que se indica que tiene una relación directa con el tamaño de la ZPF. La relación no llega a cumplir de forma exacta con el comportamiento real de un material cuasi-frágil, pero pone de manifiesto que existe una relación entre ambos, lo que permitirá realizar comparaciones entre materiales (Karihaloo, 1995), (Cifuentes y Medina, 2013), entendiendo que materiales con valores parecidos de l_{ch} tendrán una longitud de su ZPF parecida y por tanto mostrarán un comportamiento similar a fractura. La relación entre ambos parámetros se puede expresar como:

$$l_{ZPF} = \frac{l_{ch}}{2\pi} \quad (6.4)$$

La obtención del valor de este parámetro se vuelve importante ya que permite conocer la mayor o menor ductilidad de un determinado material, relacionado a su vez con la mayor o menor longitud de la ZPF. Así, sobre dos materiales que presenten el mismo valor de energía de

fractura, la l_{ZPF} distinguirá el más dúctil del más frágil, lo que se vuelve de gran importancia en la caracterización del material. La longitud característica, y por tanto la l_{ZPF} no dependerá del tamaño o forma del elemento estructural analizado, siendo por tanto un valor propio del material, como indica Hillerborg *et al.* (1976) en su modelo de grieta ficticia.

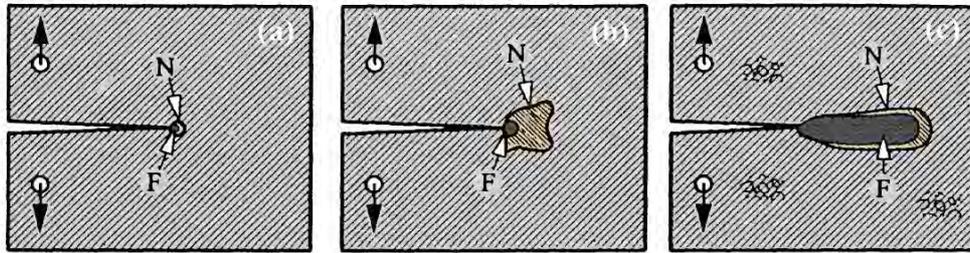


Figura 6.15: Tamaño de la ZPF según el comportamiento frágil o dúctil del material (Karihaloo, 1995)

En la figura 6.15 se representan secciones de un material tipo sometido a tracción, en el que aparecen las distintas formas que puede adoptar la ZPF, frágil (a), dúctil (b) o cuasi-frágil (c). En la figura, tomada de Karihaloo (1995), se representa con una F la zona de proceso de fractura, y con N la zona de inicio del comportamiento no lineal por donde se desplazará la ZPF. Todo este desarrollo para caracterizar la ductilidad o fragilidad de un material se puede sintetizar en el denominado *número de fragilidad* (β_H), que cuantifica la fragilidad o ductilidad de un determinado material (Hillerborg *et al.*, 1976). A mayor valor de β_H mayor fragilidad en el material, y por tanto a menor valor de β_H mayor ductilidad. Este número de fragilidad se expresa según (6.5), donde D es el valor del canto o altura de la probeta, que aparece indicado como h en la tabla 6.1

$$\beta_H = \frac{D}{l_{ch}} \quad (6.5)$$

En la tabla 6.5 aparecen los valores obtenidos de longitud característica (l_{ch}), longitud de la zona de proceso de fractura (l_{ZPF}) y número de fragilidad (β_H) para las probetas de tapial, obtenidos a partir de los datos calculados previamente de G_F , f_t y E_f .

En Hilsdorf y Brameshuber (1991) se indica que los valores de longitud característica para el hormigón están entre los 100 y los 400 mm, lo que comparado con los valores obtenidos para el tapial (173 a 372 mm) indica claramente que este material presenta un comportamiento análogo al anterior, como ya se ha venido comprobando en otras ocasiones.

Todos estos datos pueden ser trasladados a modelos sintéticos realizados con FEM donde experimentar con el comportamiento de estructuras complejas. Las simulaciones con elementos finitos sobre estructuras de hormigón han sido ampliamente utilizadas por un gran número de autores, (Shah *et al.*, 1995) (Labadi y Hannachi, 2005) (Yang y Deeks, 2007) (Barros *et al.*, 2013) (Cifuentes y Medina, 2013), destacando el trabajo realizado por Veselý y Frantík (2014) en el que calculan la posición y extensión de la ZPF desde el tramo lineal del ensayo a flexión, indicando que en ese tramo inicial O-A-B (figura 6.7) la ZPF comenzará a crecer, demostrando incluso la formación de microfisuras al llegar al punto B, punto pico.

Probeta	E_f (MPa)	G_F (N/m)	f_t (MPa)	D (h) (mm)	l_{ch} (mm)	l_{ZPF} (mm)	β_H
P-1 (3:1)	2569	30,47	0,50	104,80	313	50	0,335
P-3 (3:1)	2415	38,48	0,50	102,48	372	59	0,276
P-6 (3:1)	1953	32,89	0,46	103,12	304	48	0,340
media	2312	33,95	0,49		329	52	0,317
P-7 (4:1)	1040	25,34	0,35	104,16	215	34	0,484
P-9 (4:1)	2715	20,38	0,45	105,80	273	43	0,387
P-10 (4:1)	2528	21,92	0,39	101,24	364	58	0,278
P-11 (4:1)	1668	21,89	0,46	102,91	173	27	0,596
P-12 (4:1)	3112	26,73	0,56	102,31	265	42	0,386
media	2213	23,25	0,44		258	41	0,426

Tabla 6.5: Valores de longitud característica (l_{ch}), longitud de la zona de proceso de fractura (l_{ZPF}) y número de fragilidad (β_H) para las probetas de tapial

6.7. Análisis de los resultados obtenidos en los ensayos 3PBT

A la vista de los datos que se incluyen en la tabla 6.5 se puede interpretar que una mayor cantidad de cal en la dosificación provoca un mayor valor en los resultados de energía de fractura y tensión máxima de tracción, siendo muy poco relevante la diferencia que se produce en el módulo de elasticidad. De igual modo la cantidad de estabilizante afecta de forma directa a la longitud característica y de ZPF, como ya indicaban Wolinski *et al.* (1987), Karihaloo (1995) o Bazant y Planas (1997), de manera que a mayor cantidad de cal mayor valor de l_{ch} y de l_{ZPF} .

Esto conlleva a que las probetas de dosificación 3:1 presenten un valor inferior de número de fragilidad (β_H) siendo por tanto su comportamiento más dúctil. La mayor longitud de la ZPF provoca que una mayor cantidad de material sea *movilizado* para responder a los esfuerzos impuestos por el ensayo, lo que aumenta la capacidad del material. Se podría pensar que la mayor cantidad de cal sobre las probetas las haría más frágiles, pero ocurre el efecto contrario, presentando un comportamiento más dúctil, que hace que el material sea capaz de soportar una mayor deformación antes de fracturarse por completo. Sobre el esquema del efecto de las fuerzas cohesivas que se representa en la figura 6.16, se puede entender que a una mayor longitud de ZPF la zona anterior al valor último w_{cu} será más profunda, por lo que para llegar al valor último será necesario una apertura mayor.

De esa manera, si se representa sobre las curvas σ - w (figura 6.17) los valores de f_t medios de las dos dosificaciones se comprueba como los valores finales de cada una ellas también se modifican. Del mismo modo valores intermedios situado en cualquier punto de la curva $\sigma(w)$ deberán ser mayores para la dosificación 3:1 que para la 4:1.

Si se revisan los valores que aparecen en las figuras del apéndice B para un determinado momento de la curva ablandamiento, por ejemplo para el valor $P=100$ N, se pueden calcular los valores de apertura de la grieta, comprobando que la situación descrita en la figura 6.17 se cumple. Así para las curvas de las probetas de dosificación 3:1 los valores de apertura serían P-1=0,73; P-3=0,57 y P-6=0,61 mm, mientras que para las curvas de las probetas con dosificación 4:1 los valores serían P-7=0,44; P-9=0,44; P-10=0,45; P-11=0,42 y P-12=0,50 mm. En la figura

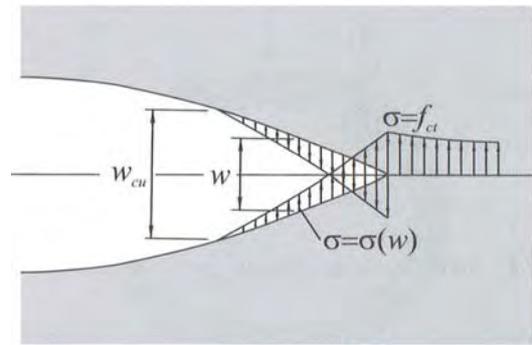


Figura 6.16: Efecto de las fuerzas cohesivas en el vértice de la fractura según Hillerborg *et al.* (1976), tomado de Cifuentes y Medina (2013)

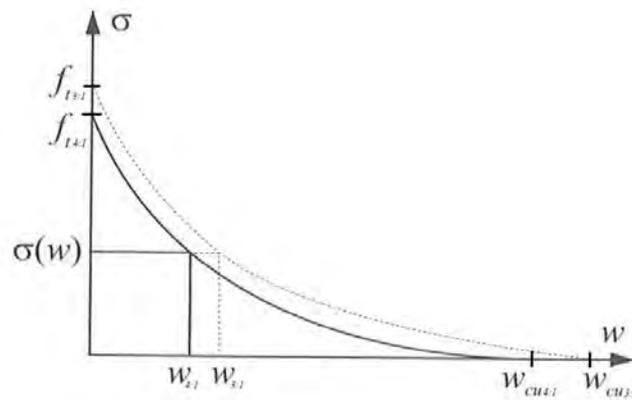


Figura 6.17: Curva σ - w según dosificaciones de las probetas de tapial

6.18 se representan los valores obtenidos, quedando claramente segmentados en dos bloques perfectamente diferenciados.

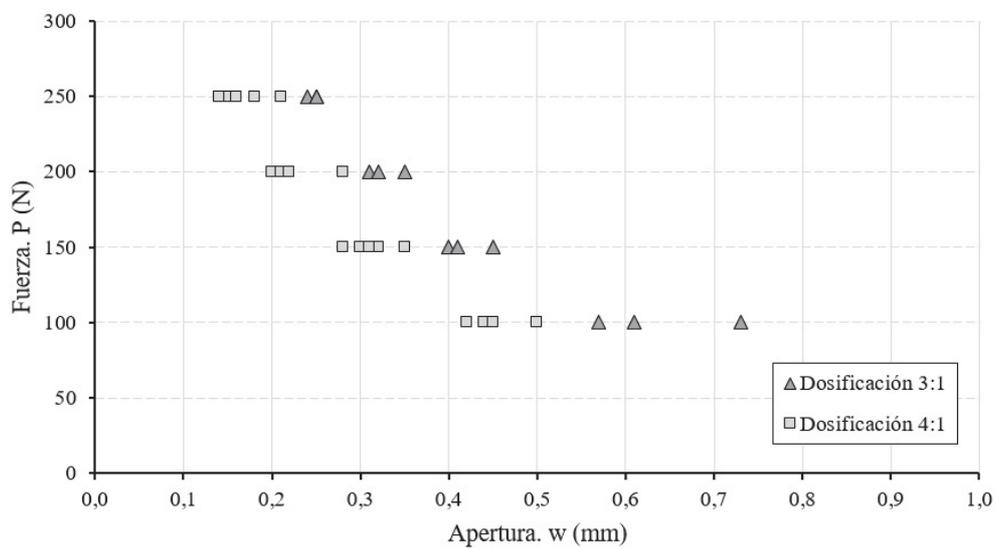


Figura 6.18: Valores de apertura en $\sigma(w)=100, 150, 200$ y 250 N, según dosificaciones de las probetas prismáticas de tapial

Capítulo 7

Ensayos de velocidad de pulso ultrasónico (UPV) en probetas

De manera paralela al control de la pérdida de peso, que se puede consultar en el capítulo 10, se han medido las variaciones de velocidad de un pulso ultrasónico (UPV) en el interior de las probetas. El ensayo se ha realizado tanto sobre las probetas cúbicas como sobre las probetas prismáticas, hasta alcanzar valores estables que se entienden como los propios del material.

El uso de UPV sobre materiales estructurales esta muy extendido y se viene aplicando desde hace varias décadas con resultados muy fiables (Elvery e Ibrahim, 1976), (Krauß y Hariri, 2006), tanto sobre materiales compactos como sobre materiales dañados (Shah *et al.*, 1995). Aún así, como se destacaba en la introducción, son pocos los autores que lo han aplicado al tapial, si bien éstos siguen utilizando el cemento como estabilizante en sus probetas. Su principio de funcionamiento se basa la propagación de una onda de compresión (onda-p) dentro de un cuerpo sólido, midiendo el tiempo que tarda en atravesar una distancia conocida. La forma de desplazarse la onda en el medio sólido es similar a como se desplazan las ondas sonoras en el aire. Al excitar un sólido mediante un impulso se generan, además de las ondas de compresión utilizadas en el ensayo, ondas de cortante (ondas-s) y ondas Rayleigh en la superficie de la probeta, sin bien su velocidad es menor que la de las ondas-p (Malhotra y Carino, 2003).

La velocidad particular de cada onda en el medio dependerá de las propiedades elásticas de éste y de su densidad, tal y como se indica en el anejo C de la norma UNE-EN:12504-4 (2006) y en ASTM-C:597-02 (2003), según la expresión (7.1). En ella V es la velocidad del pulso ultrasónico, E es el módulo de elasticidad dinámico, ρ la densidad y ν el coeficiente de Poisson dinámico, siendo los dos primeros parámetros los que más influyen en el valor de la velocidad.

$$V = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (7.1)$$

Para llevar a cabo la medición y obtener la evolución de UPV en las probetas se ha empleado un *medidor ultrasónico* modelo 58-E0048, fabricado por la marca Controls, al que se acoplan transductores palpadores con un rango de frecuencias de 54 kHz. Este rango se asocia con longitudes de onda en torno a los 68 mm, valor muy superior al tamaño máximo del árido contenido en las probetas, limitado a 10 mm. Los valores de longitud de onda inferiores o cercanos al tamaño del árido pueden sufrir problemas de dispersión de la energía de la onda de compresión aplicada, provocando una rápida atenuación (Malhotra y Carino, 2003), por lo que se ha optado por alejarse de los valores límite inferiores. La frecuencia seleccionada de 54 kHz cumple también las limitaciones de longitud mínima de la probeta (100 mm) que se indican tanto en la recomendación de RILEM (1994) para ensayos con ultrasonidos, como en la norma UNE-EN:12504-4 (2006).

En el ensayo se registra el tiempo que la onda de compresión tarda desde que es emitida por el transductor emisor hasta que se recoge en el transductor receptor, moviéndose longitudinalmente por el interior de la probeta. Una vez conocido el intervalo de tiempo, Δt y midiendo la longitud recorrida en el interior del sólido L se puede calcular la velocidad mediante la expresión (7.2).

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (7.2)$$

En el interior de la probeta se pueden generar diversas dispersiones de la onda-p al encontrarse con las interfases entre áridos y matriz aglomerante, lo que dará lugar a la presencia de ondas-p reflejadas, apareciendo también ondas-s. Aún así el tamaño de longitud de onda con el que se trabaja (~ 68 mm) frente al tamaño máximo de árido (10 mm) y la velocidad de la onda-p recorriendo el camino más corto entre los transductores proporciona el suficiente nivel de confianza en el ensayo. Esta confianza se ve reforzada al comprobar la estabilidad de los datos obtenidos en el gran número de probetas estudiadas.

De forma previa a la realización del ensayo se comprueba la fiabilidad de la lectura mediante el uso de un calibrador, ajustando el tiempo según las indicaciones del fabricante. Los transductores (o palpadores) deben presentar un contacto lo más directo y continuo posible con las caras de la probeta, evitando la presencia de aire entre ambos. El aire provocará un retraso en la circulación de la onda-p, y por tanto un error en la lectura. Para evitar este efecto y mejorar las condiciones de acoplamiento de los transductores con las caras de las probetas se emplean diversos materiales como glicerinas, vaselinas, plastilinas, grasa, jabón líquido, etc. El espesor de estos *acoplantes* debe ser el menor posible, procediendo a la lectura de los valores de velocidad como el menor de los indicados que aparezca de forma estable.

En este apartado de la memoria se analiza el comportamiento de UPV dentro de las probetas de tapial tradicional, relacionándolo con los datos comentados en el capítulo anterior y buscando una correspondencia con los siguientes ensayos. De esta manera se introduzcan los factores que afectan a los datos de UPV, que ya son señalados en el anejo C de la norma UNE-EN:12504-4 (2006) donde se indica que la dosificación, cantidad de agua de amasado y madurez de la probeta son factores a conocer para la caracterización y análisis de los datos aportados por

este ensayo sobre distintas muestras. En el mismo sentido se puede consultar el trabajo de Kaplan (1961) donde se indica que una mayor relación agua-cemento disminuye la resistencia del hormigón y por tanto la UPV. Una correlación entre porcentaje de agua y UPV con la resistencia a compresión en probetas de hormigón aparece también en el trabajo de Quintero *et al.* (2014), obteniendo resultados de vinculación directa entre los tres parámetros, con mayores valores en función de una mayor presencia de agua en las probetas durante su curado, lo que favorece la correcta hidratación del cemento. La norma UNE-EN:12504-4 (2006) se expresa en este mismo sentido, vinculando el aumento de UPV a la mayor hidratación y, por tanto, curado del cemento.

Es necesario indicar nuevamente que la cal utilizada como estabilizante en las probetas de tapial ejecutadas, fragua en gran medida por la captura de moléculas de CO₂ del aire, por lo que los resultados no pueden ser iguales a si se hubiera utilizado cemento, como ocurre en los trabajos realizados por Galán-Marín *et al.* (2013) y Canivell *et al.* (2018).

En los ensayos realizados en el laboratorio los transductores se han colocado en las caras *exteriores* de las probetas prismáticas, es decir, aquellas caras que quedarían en el exterior de un muro de 44 cm de espesor, tal y como se indica en la figura 7.1. En ella se representa la posición hipotética de una probeta prismática en el interior del un muro, y las caras *exteriores* de la misma. Esa disposición del ensayo hace que la onda-p atraviese la probeta en un sentido paralelo a las capas de compactación, ya que sería la forma en la que el ensayo se podría realizar sobre un muro existente. Las probetas cúbicas se miden también de la misma manera para evitar introducir diferencias entre los ensayos, al margen de las propias aportadas por el material. En la figura 7.2 aparece una de las probetas de la serie 1 durante el ensayo de UPV, con los transductores sujetos mediante una mordaza que asegura su estabilidad.

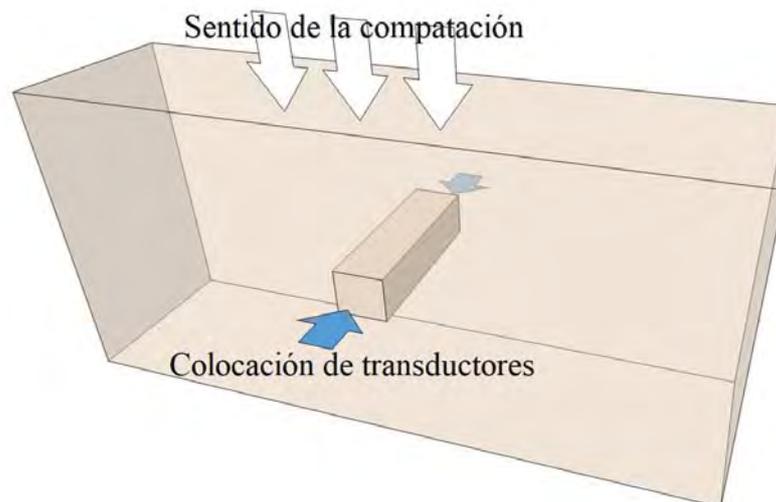


Figura 7.1: Esquema de colocación de transductores en la realización de los ensayos UPV en probetas prismáticas



Figura 7.2: Probeta cúbica durante la realización de los ensayos UPV

7.1. Evolución temporal de UPV en las probetas prismáticas

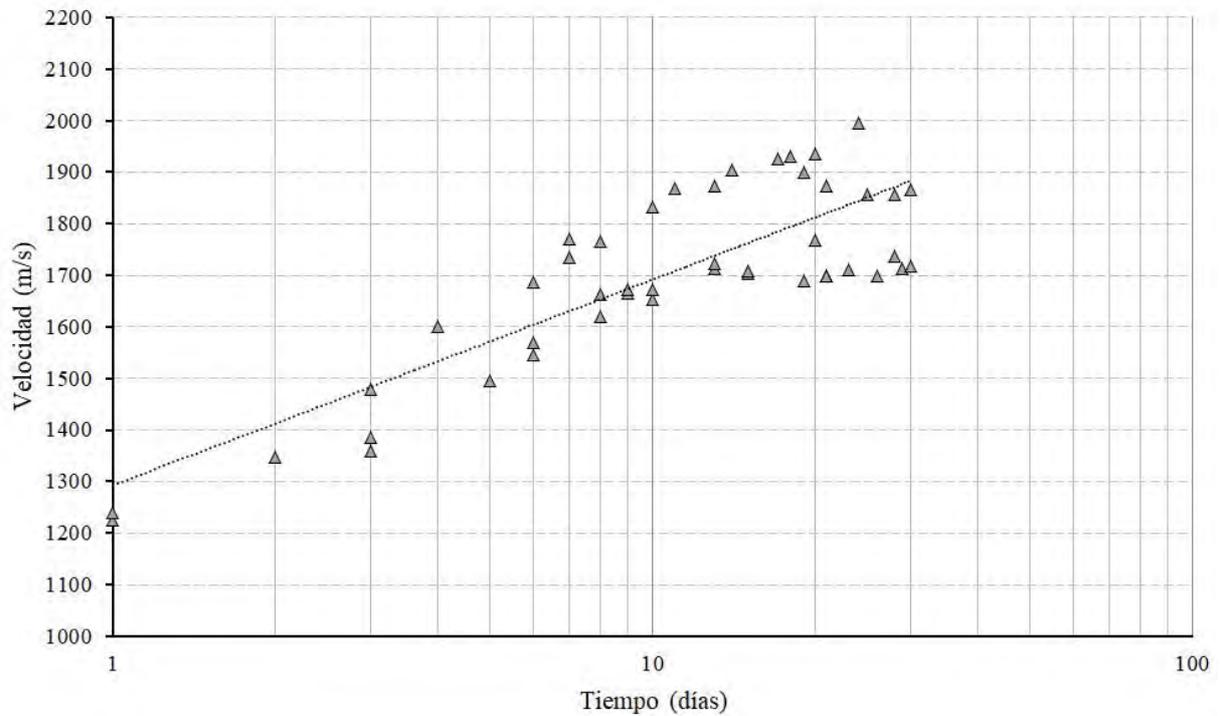
Se ha realizado un control temporal de la variación de la velocidad de la onda-p en el interior de las probetas prismáticas durante un periodo de tiempo entre 22 y 28 días posteriores a la fabricación de la mismas. Mediante el control de la variación de la velocidad de la onda-p en las probetas se ha podido comprobar el efecto que la pérdida de humedad producen en las mismas. El ensayo no se ha dilatado más en el tiempo porque se ha podido constatar que los datos se vuelven estables en un periodo cercano a los 15 días ¹.

En la figura 7.3 aparecen los datos de evolución de UPV en las probetas primáticas en función de su dosificación. La tendencia al aumento de velocidad es claro en ambos casos, ofreciendo un resultado análogo a lo que ocurre en probetas de hormigón. Si se comparan los datos obtenidos de cada una de las dosificaciones empleadas de forma conjunta se observa un comportamiento prácticamente paralelo, con valores ligeramente superiores para las probetas de dosificación 4:1, como aparece en la figura 7.4. Si se prescinde del valor del punto de inicio de la comparación y se utilizan los valores de incremento de UPV acumulados (figura 7.5) se observa un comportamiento idéntico en ambas dosificaciones.

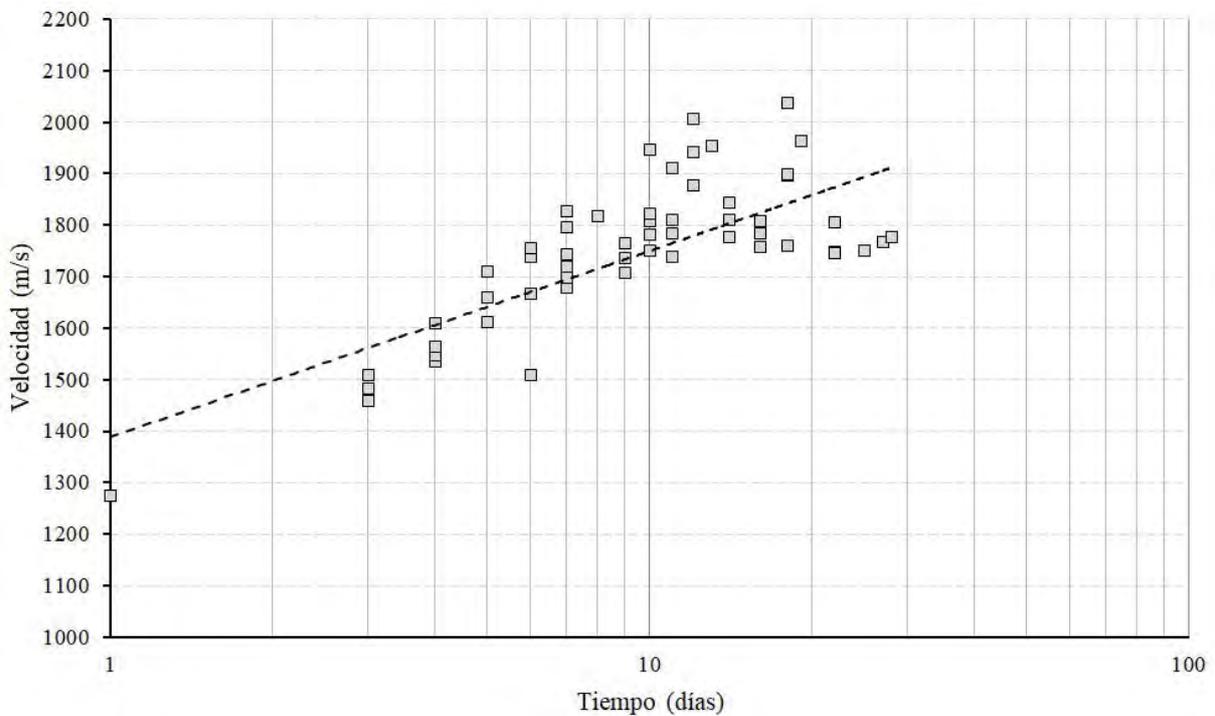
En estas mismas figuras se puede ver como en los primeros cinco días desde la fecha de fabricación de las probetas el incremento acumulado de UPV llega a ser de un 26 a 28 % sobre el valor inicial (lo que representa alrededor de un 60 % del incremento total), con valores medios en torno a los 1550 m/s para la dosificación 3:1 y 1625 m/s para la dosificación 4:1. Al alcanzar los diez días el incremento acumulado de UPV llega a un 40 % sobre el valor inicial (un 93 % del valor del incremento final) con velocidades entre los 1750 m/s para 3:1, y 1825 m/s para 4:1. Finalmente, en el día quince, los incrementos sobre el valor inicial están en torno al 43 %,

¹La evolución de cada una de las probetas prismáticas se puede consultar en el apéndice C

con velocidades medias de 1815 m/s para las probetas de dosificación 3:1 y 1870 m/s para las 4:1.



(a) Dosificación 3:1



(b) Dosificación 4:1

Figura 7.3: Variación de UPV en probetas prismáticas por dosificación.

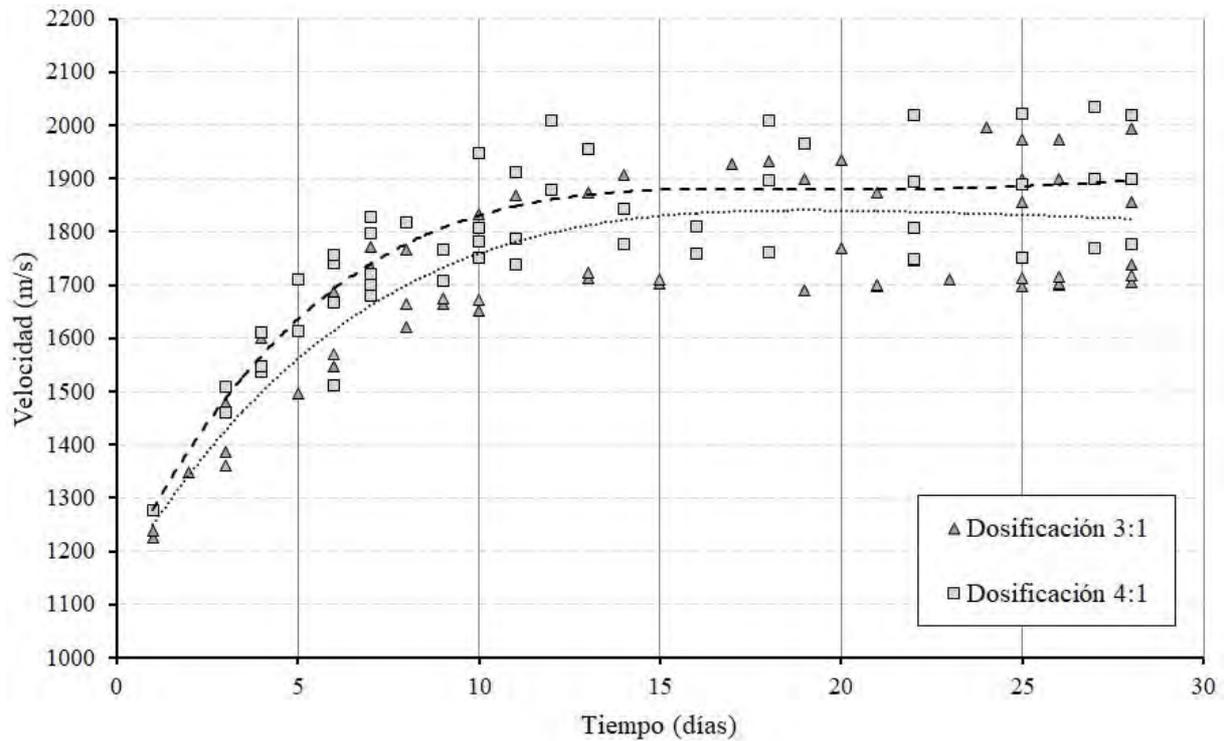


Figura 7.4: Variación temporal de UPV en probetas prismáticas. En línea de puntos probetas con dosificación 3:1, línea de trazos probetas con dosificación 4:1

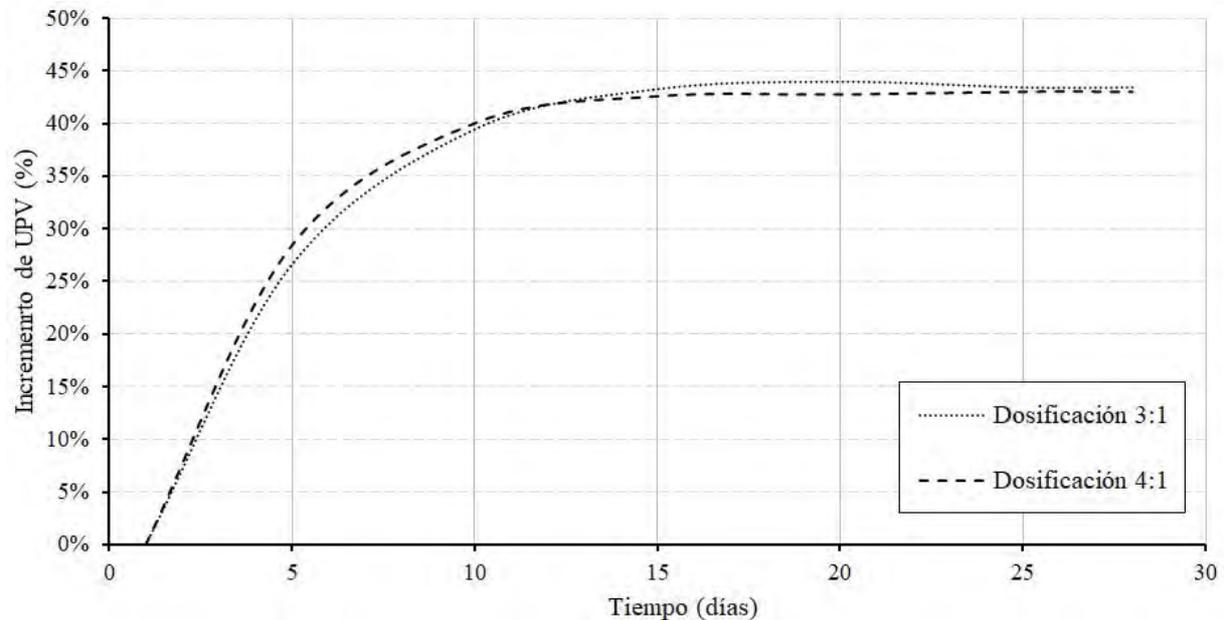


Figura 7.5: Incremento acumulado de UPV en probetas prismáticas

A partir de esa fecha de los quince días se observa claramente como los valores de UPV se vuelven estables, si bien el proceso de endurecimiento de las probetas continuará a la vez que la carbonatación mantiene su acción en el interior del material. Es por ese motivo por el cual las probetas se almacenan en el laboratorio durante un periodo de tiempo mucho mayor antes de someterlas a los ensayos destructivos, para favorecer y completar los efectos de la carbonatación. Más adelante, en el capítulo 9, se abordará detenidamente este asunto y sus consecuencias.

7.2. Datos finales de UPV en probetas cúbicas y prismáticas

Los datos finales de UPV de las series de probetas cúbicas y de las probetas prismáticas aparecen en el gráfico de la figura 7.6. Si se analizan los datos de cada una de las probetas y dosificaciones se pueden extraer una serie de conclusiones que podrán ayudar a la interpretación de los datos posteriores.

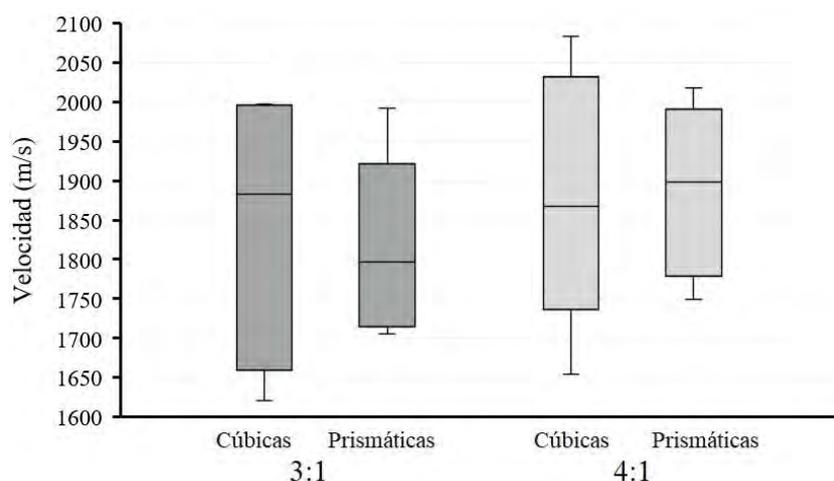


Figura 7.6: Datos de resultados finales de UPV en probetas cúbicas y prismáticas según su dosificación

- Las series de probetas cúbicas presentan una mayor dispersión que las prismáticas.
- Los valores extremos no están muy alejados de los valores superior e inferior de la caja, destacando la poca amplitud de los que aparecen en las probetas prismáticas de dosificación 4:1.
- Las probetas con dosificación 4:1 presentan valores más altos de UPV de manera general, con valores superiores en el primer y tercer cuartil, quedando en este último cerca del valor de las series cúbicas de dosificación 3:1.
- Los valores de la mediana en las probetas de dosificación 4:1 están casi centrados en la caja, lo que nos indica que existe una distribución de datos homogénea.

Con estos datos preliminares se analizan a continuación los datos numéricos de cada una de las series y probetas de tapial. En las tablas 7.1 y 7.2 se resumen los datos de cantidad de agua de amasado, agua final, densidad ² y UPV para la serie de probetas cúbicas y prismáticas

Serie	Agua (%)		Densidad final (g/cm ³)	UPV (m/s)
	amasado	final		
Dosificación 3:1				
1	9	0,92	2,04	1997
2	10	2,50	1,99	1991
3	8	3,10	1,88	1774
10	9	1,46	1,90	1621
11*	9	0,88	1,63	1052
			media	1846
Dosificación 4:1				
4	8	2,87	1,92	1654
5	9	2,63	1,98	1941
6	10	3,32	2,05	2015
7	9	3,65	2,01	2084
8	8	1,31	1,93	1763
9	10	2,69	2,04	1795
			media	1875

Tabla 7.1: Relación entre agua, densidad final y valores de UPV en probetas cúbicas

Serie	Agua (%)		Densidad final (g/cm ³)	UPV (m/s)
	amasado	final		
Dosificación 3:1				
P-1	9	1,43	2,00	1992
P-2	9	1,17	1,99	1738
P-3	9	0,43	1,99	1856
P-4	9	1,29	1,94	1705
P-5	9	1,73	1,94	1718
P-6	9	1,28	2,01	1899
			media	1818
Dosificación 4:1				
P-7	9	1,34	1,99	1778
P-8	9	1,29	2,02	1749
P-9	9	1,40	1,98	1807
P-10	9	1,29	2,04	1965
P-11	9	1,06	2,02	1899
P-12	9	1,37	2,02	2019
			media	1870

Tabla 7.2: Relación entre agua, densidad final y valores de UPV en probetas prismáticas

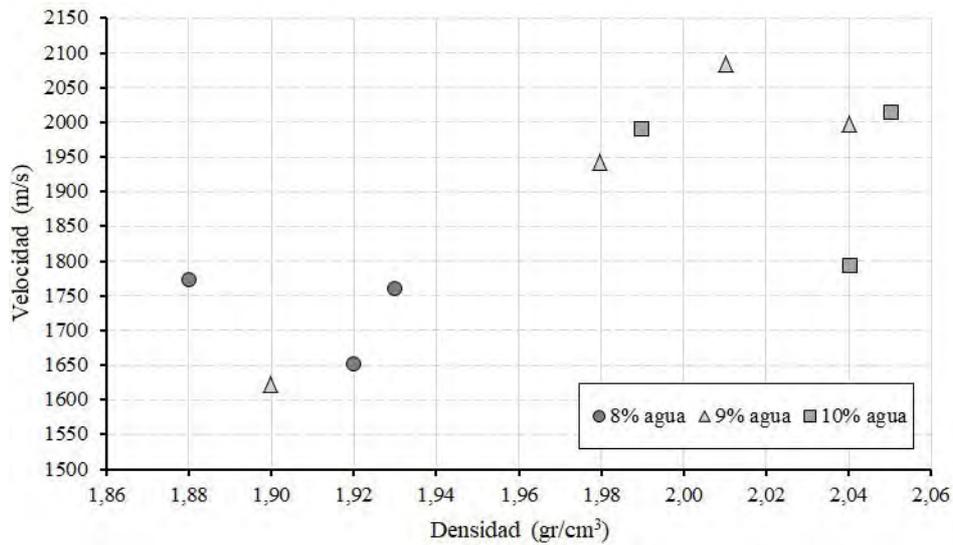
A nivel numérico se puede indicar que para las probetas cúbicas la media de la velocidad de aquellas fabricadas con una dosificación 3:1 está en los 1846 m/s, mientras que para la dosificación 4:1 es de 1875 m/s, lo que supone un incremento de un 1,57 %, que se podría considerar como inexistente. Por su parte, si se realiza la misma operación para las probetas prismáticas se obtiene un valor de 1818 m/s para la dosificación 3:1 y 1870 m/s para la dosificación 4:1, lo que supone un incremento del 2,80 %, que también se puede considerar muy bajo. Esta diferencia se ponía ya de manifiesto en la figura 7.4.

²Los datos aportados aparecen en el capítulo 10

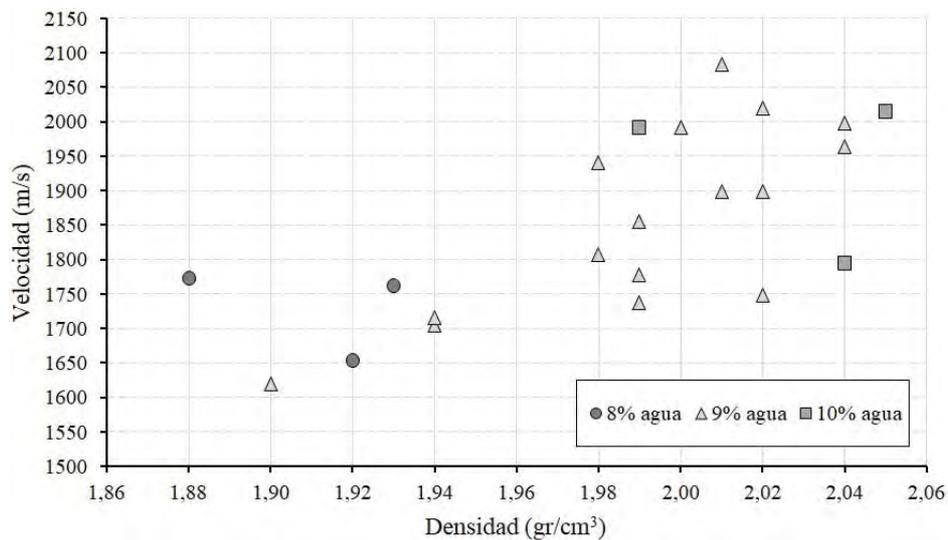
Si se analizan los resultados en función de la cantidad de agua de amasado en lugar de por la dosificación obtenemos que la velocidad media para las probetas con una cantidad de agua de amasado de un 8 % es de 1730 m/s, para el 9 % 1911 m/s y para un 10 % 1934 m/s. Estos valores son tomados únicamente de las probetas cúbicas y significaría un aumento de un 10,43 % en el paso de 8 a 9 % de agua, y un 1,20 % en el paso de 9 a 10 % de agua. Si se incorporan los datos de las probetas prismáticas, todas ellas fabricadas con un 9 % de agua de amasado, la velocidad media de todas las probetas elaboradas con ese porcentaje de agua pasa a ser de 1860 m/s, por lo que la diferencia con el 8 % de agua de amasado sería de un 7,52 % y con el 10 % de agua de amasado un 3,93 %. El valor del coeficiente de correlación (R) entre la densidad y UPV es 0,932 en las probetas cúbicas y 0,700 en las prismáticas. Si se consideran todas las probetas el valor de R sería 0,893.

Estos datos ya son más llamativos y ponen en relación los valores de agua de amasado con la velocidad UPV y con la densidad de las probetas, como se indica en las normas y en los estudios de los autores indicados previamente.

En la figura 7.7 se puede comprobar como los valores bajos de agua de amasado (8 %) se relacionan con los menores resultados tanto de densidad como de UPV, mientras que los valores altos de agua de amasado (10 %) lo hacen con los mayores. Los valores intermedios de agua (9 %) participan de todo el rango de resultados, constituyendo un estado intermedio entre los dos anteriores.



(a) Relación velocidad-densidad en series de probetas cúbicas



(b) Relación velocidad-densidad en series de probetas cúbicas y prismáticas

Figura 7.7: Relación velocidad-densidad en probetas de tapial

7.3. Valores de módulo de elasticidad en tapial a partir de UPV

Conocido el dato de la velocidad UPV en las probetas y a partir de la expresión (7.1) se puede estimar un primer valor de módulo de elasticidad dinámico en las probetas de tapial. Aún no se ha podido obtener el coeficiente de Poisson, por lo que se utilizará un valor tomado de los trabajos de autores anteriores. Así podemos encontrar valores de ν en [González *et al.* \(1997\)](#), [Miccoli *et al.* \(2014\)](#) y [Shrestha *et al.* \(2020\)](#). Para el primero de los autores los valores de coeficiente de Poisson varían entre 0,20 y 0,30, en función de la localización del tapial, cimentación o estructura respectivamente de la torre de Comares. El segundo de los autores

propone un valor medio entre los anteriores de $\nu=0,27$, mientras que el último de los autores lo lleva hasta $\nu=0,15$.

Serie	Agua final (%)	Densidad (g/cm ³)	UPV (m/s)	$E_{din-UPV}$ (MPa)
Dosificación 3:1				
1	0,92	2,04	1997	6044
2	2,50	1,99	1991	5860
3	3,10	1,88	1774	4395
10	1,46	1,90	1621	3709
11*	0,88	1,63	1052	1340
Dosificación 4:1				
4	2,87	1,92	1654	3902
5	2,63	1,98	1941	5541
6	3,32	2,05	2015	6183
7	3,65	2,01	2084	6485
8	1,31	1,93	1763	4456
9	2,69	2,04	1795	4883

Tabla 7.3: Estimación del módulo de elasticidad dinámico en series de probetas cúbicas a partir de la UPV y la densidad, para $\nu=0,30$

Serie	Agua final (%)	Densidad (g/cm ³)	UPV (m/s)	$E_{din-UPV}$ (MPa)
Dosificación 3:1				
P-1	1,43	2,00	1992	5895
P-2	1,17	1,99	1738	4465
P-3	0,43	1,99	1856	5092
P-4	1,29	1,94	1705	4189
P-5	1,73	1,94	1718	4254
P-6	1,28	2,01	1899	5385
Dosificación 4:1				
P-7	1,34	1,99	1778	4673
P-8	1,29	2,02	1749	4590
P-9	1,40	1,98	1807	4803
P-10	1,29	2,04	1965	5851
P-11	1,06	2,02	1899	5411
P-12	1,37	2,02	2019	6117

Tabla 7.4: Estimación del módulo de elasticidad dinámico en probetas prismáticas a partir de la UPV y la densidad, para $\nu=0,30$

El valor indicado en [Shrestha et al. \(2020\)](#) de $\nu=0,15$ correspondería más a un material de naturaleza cerámica o vidriada, por lo que no se tendrá en consideración para este primer cálculo aproximativo del módulo de elasticidad. Se debe recordar que el valor de ν para el hormigón está alrededor de 0,20. Este valor de 0,20 es el mismo que se obtiene sobre la cimentación de la torre de Comares, ejecutada con un nivel de calidad material muy superior al de los muros aéreos de tapial, por lo que también se descarta. Sobre los otros datos aportado por la literatura consultada, 0,27 y 0,30, se pueden dar por válidos ambos en un primer momento, a los efectos de un pre-cálculo a partir de los datos de UPV. De esa manera se utilizará un valor de $\nu=0,30$ en este cálculo inicial, valor igual al de la torre de Comares.

En las tablas 7.3 y 7.4 se indican los valores de módulo de elasticidad dinámico de cada

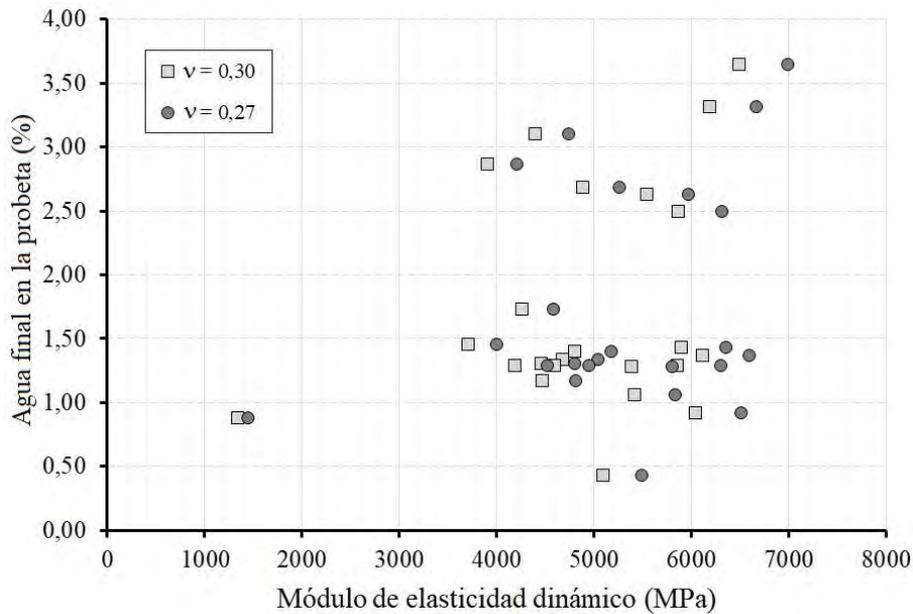


Figura 7.8: Relación de agua en probeta y módulo de elasticidad dinámico

una de las series y probetas de tapial fabricadas para ese valor de coeficiente de Poisson. Se comprueba como las dosificaciones de 3:1 en conjunto presentan un valor de $E_{din-UPV}$ medio entre 4880 y 5002 MPa para probetas prismáticas y cúbicas respectivamente, mientras que la dosificación 4:1 llega a valores de 5242 MPa en ambos tipos de probetas.

En cuando a la influencia de la cantidad de agua en las probetas sobre la estimación del módulo de elasticidad dinámico se comprueba que en este momento su valor no presenta una gran influencia. Así, este dato indicaría que no sería necesario conocer su valor para realizar una estimación del valor de E_{din} sobre estructuras existentes.

En la figura 7.8 se representan los valores de agua final en probetas y módulo de elasticidad dinámico para valores de ν de 0,30 y 0,27. Se puede comprobar como para valores menores de coeficiente de Poisson el módulo de elasticidad dinámico sobre la misma probeta es más alto. La sensibilidad de E_{din} frente al coeficiente de Poisson aumenta cuanto mayor es su propio valor. Así se observa como probetas con un valor $E_{din} = 6000$ MPa para $\nu = 0,30$ pasan a 6500 MPa con un $\nu = 0,27$ ($\Delta E_{din} = 500$ MPa), mientras que probetas que marcan un valor $E_{din} = 1300$ MPa para $\nu = 0,30$ pasan a 1450 MPa con un $\nu = 0,27$ ($\Delta E_{din} = 150$ MPa).

En la misma figura se observa como no existe una razón entre los valores de agua en las probetas y su módulo de elasticidad dinámico, quedando los valores dispersados sin responder a ninguna relación. Así se puede comprobar existen valores de E_{din} en torno a los 6000 MPa en probetas con unas cantidades de agua entre 1 y 3,3 %, por lo que se puede entender que no hay una relación entre ambos parámetros.

Capítulo 8

Ensayos de frecuencia-resonancia (FFRF) sobre probetas de tapial

8.1. Base teórica del ensayo

El método de la frecuencia-resonancia (FFRF) se basa en la propiedad que presentan los cuerpos sólidos de vibrar de forma natural en una determinada frecuencia (llamada *frecuencia natural* o *periodo propio de vibración*) cuando son excitados por una acción exterior. Este efecto ocurre no sólo sobre sólidos de pequeño o mediano tamaño, sino también sobre estructuras más complejas como edificios o puentes, siendo de todos conocido el famoso movimiento del puente de Tacoma Narrows al entrar en resonancia con la vibración inducida por el viento.

En los sólidos, vigas o probetas, la frecuencia natural de vibración está relacionada con el módulo de elasticidad dinámico (E_{din}) y la densidad (ρ), de una manera análoga a lo que sucede con la UPV, vista anteriormente. Los sólidos sobre los que se puede aplicar esta técnica FFRF deben ser cuerpos isótropos, homogéneos y perfectamente elásticos, habiendo sido utilizada sobre hormigón con resultados muy satisfactorios. De forma similar a lo que sucede con el hormigón, en esta tesis se utiliza esta técnica sobre probetas de tapial, dado que la composición a nivel material entre hormigón y el tapial es semejante. La isotropía y homogeneidad del material parece clara a partir de los trabajos de [Bui y Morel \(2009\)](#), si bien el comportamiento perfectamente elástico no queda tan claro a tenor de los resultados que se exponen en el capítulo 5.

El método se basa en una idea absolutamente original desarrollada por [Powers \(1938\)](#) en Estados Unidos, mediante el cual relacionaba el tono que emitían una serie de vigas al ser golpeadas con un martillo con el tono calibrado de un grupo de campanas del cual se conocía su frecuencia de vibración. Así, de esta forma tan original, se podía estimar la frecuencia de vibración de las vigas a través del sonido que emitían ([Malhotra y Carino, 2003](#)). Evidentemente este original sistema adolece de cierta subjetividad, siendo posteriormente mejorado por otros investigadores, como [Hornibrook \(1939\)](#), [Thompson \(1940\)](#), [Obert y Duvall \(1941\)](#) o [Stanton](#)

(1944) entre otros, que incorporaron equipos de medida electrónicos sobre las probetas, que eran ahora excitadas mediante un inductor de frecuencias.

El sistema utilizado en esta tesis retoma el uso de un martillo para inducir la vibración sobre las probetas, debiendo su desarrollo al trabajo de [Gaidis y Rosenberg \(1986\)](#). Las frecuencias y la amplitud de onda provocadas por el impacto son registradas por un acelerómetro colocado en el borde de la probeta, y sujeto a ésta mediante una capa de cera natural. La señal es enviada a un analizador (software) que determina la frecuencia propia de la probeta mediante la *transformada de Fourier*.

El ensayo FFRF mide tres frecuencias naturales de la probeta, mediante tres formas de excitación distintas, según se indica en [UNE-EN:12680-1 \(2007\)](#) y en [ASTM-C:215-19 \(2019\)](#). En la figura 8.1 aparecen los esquemas de los tres modos de excitación, transversal, longitudinal y torsional. La posición del acelerómetro (representado con un pequeño cilindro naranja), el punto sobre el que se aplica el impulso mediante el martillo (indicado con la flecha) y la forma de apoyar las probetas, determinarán el modo de excitación que se está analizando. La línea de puntos indica la sección nodal de la probeta en función del modo de ensayo.

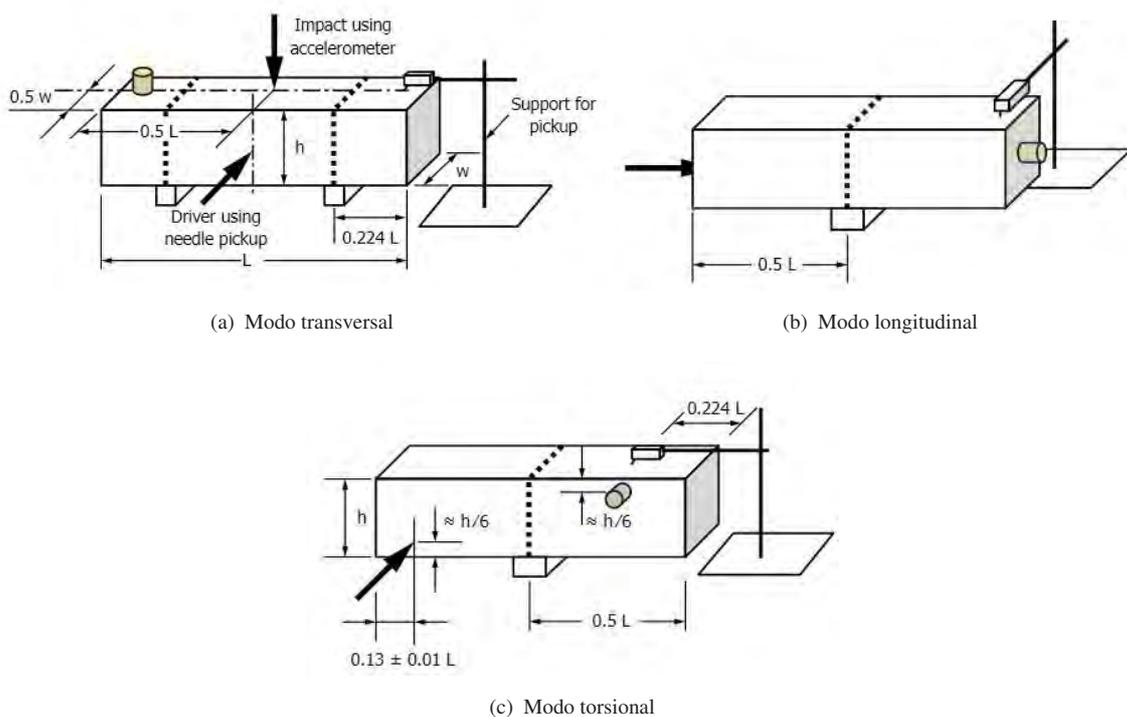


Figura 8.1: Modos de excitación de probetas. [ASTM-C:215-19 \(2019\)](#)

Las probetas se deben apoyar sobre sus nodos (puntos de desplazamiento nulo) para permitir una vibración libre en cada uno de los modos de vibración. De esa manera, y como se puede ver en la figura 8.1 para el modo transversal los apoyos se deben situar a una distancia de 0,224 veces la longitud de la probeta, medido desde la caras exteriores, ya que en estos puntos nodales la amplitud es cero. Por su parte, en los modos longitudinal y torsional, el punto nodal se encuentra en el centro de la probeta, por lo que se deberán apoyar de esa manera para no interferir en la medida de amplitud máxima. La zona de amplitud máxima se localiza en todos

los casos en los extremos de las probetas, siendo por tanto estos puntos en los que se debe situar el acelerómetro.

El apoyo central en los modos longitudinal y torsional puede provocar problemas de estabilidad en la probeta durante el ensayo. Por este motivo las muestras han sido colocadas sobre una capa de material esponjoso, sin que este sistema de apoyo afecte a los datos registrados (Malhotra y Carino, 2003).

La frecuencia natural estará directamente relacionada con la longitud y la sección de la probeta, además de con su masa. Autores como Higuchi y Kesler (1954), Jones (1962) y otros advierten de la dificultad que presenta este método al ser aplicado a probetas con una relación baja o muy alta entre su longitud y su sección, obteniéndose los mejores resultados en aquellas con una relación entre 3 y 5. En norma ASTM-C:215-19 (2019) se indican las expresiones desde las cuales se pueden obtener el módulo de elasticidad dinámico E_{din} de las probetas, a partir de los modos transversal y longitudinal, y el módulo de rigidez transversal dinámico G_{din} a partir del modo de vibración torsional.

Así, sobre probetas prismáticas, el valor de E_{din} en pascales calculado a partir del modo de vibración **transversal** se expresa como:

$$E_{din-transv} = \frac{0,9464L^3T}{bt^2} Mn^2 \quad (8.1)$$

Donde:

L = longitud de la probeta (m)

b = ancho de la sección transversal de la probeta (m)

t = canto o altura de la sección transversal de la probeta (m)

M = masa de la probeta (kg)

n = frecuencia natural en modo transversal (Hz)

T = factor corrector en función del radio de giro K, la longitud de la probeta L y el coeficiente de Poisson

El radio de giro para probetas prismáticas se obtiene a partir del canto o altura t mediante la expresión $K = t/3,464$.

Este factor corrector T se puede obtener de la tabla que aparece en la figura 8.2, tomada de la norma ASTM-C:215-19 (2019). En el caso de tener valores de coeficiente de Poisson distintos de los que aparecen en la tabla, dicho factor se puede calcular mediante la expresión:

$$T' = T \left[\frac{1 + (0,26\mu + 3,22\mu^2)K/L}{1 + 0,1328K/L} \right] \quad (8.2)$$

Donde T toma el valor de la columna $\nu = 0,17$ para el valor indicado por K/L.

K/L	Valor de T			
	$\mu = 0.17$	$\mu = 0.20$	$\mu = 0.23$	$\mu = 0.26$
0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.01	1.01	1.01	1.01	1.01
0.02	1.03	1.03	1.03	1.03
0.03	1.07	1.07	1.07	1.07
0.04	1.13	1.13	1.13	1.14
0.05	1.20	1.20	1.21	1.21
0.06	1.28	1.28	1.29	1.29
0.07	1.38	1.38	1.39	1.39
0.08	1.48	1.49	1.49	1.50
0.09	1.60	1.61	1.61	1.62
0.10	1.73	1.74	1.75	1.76
0.12	2.03	2.04	2.05	2.07
0.14	2.36	2.38	2.39	2.41
0.16	2.73	2.75	2.77	2.80
0.18	3.14	3.17	3.19	3.22
0.20	3.58	3.61	3.65	3.69
0.25	4.78	4.84	4.89	4.96
0.30	6.07	6.15	6.24	6.34

Figura 8.2: Valores del factor corrector T, según [ASTM-C:215-19 \(2019\)](#)

Por otro lado el valor de E_{din} , en pascuales, sobre probetas prismáticas calculado a partir del modo de vibración **longitudinal** se expresa como:

$$E_{din-long} = \frac{4L}{bt} M (n')^2 \quad (8.3)$$

Donde:

L = longitud de la probeta (m)

b = ancho de la sección transversal de la probeta (m)

t = canto o altura de la sección transversal de la probeta (m)

M = masa de la probeta (kg)

n' = frecuencia natural en modo longitudinal (Hz)

Finalmente el valor de G_{din} , en pascales, sobre probetas prismáticas calculado a partir del modo de vibración **torsional** se expresa como:

$$G_{din-torsion} = \frac{4LR}{A} M(n'')^2 \quad (8.4)$$

Donde:

L = longitud de la probeta (m)

A = área de la sección de la probeta (m²)

M = masa de la probeta (kg)

n'' = frecuencia natural en modo torsional (Hz)

R = factor de forma de valor 1,183 para secciones cuadradas, o $(a/b+b/a)/[4a/b-2, 52(a/b)^2+0, 21(a/b)^6]$ para secciones en las que la altura (a) es menor que la anchura (b)

A partir de los valores de E_{din} y G_{din} obtenidos previamente, se puede calcular el coeficiente de Poisson dinámico mediante la siguiente expresión:

$$\nu_{din} = \frac{E_{din}}{2G_{din}} - 1 \quad (8.5)$$

8.2. Material empleado en los ensayos FFRF

Como se ha indicado anteriormente el equipo necesario para poder realizar el ensayo de frecuencia resonancia sobre las probetas se compone de un inductor (martillo), un transductor-receptor (acelerómetro) y un analizador que mostrará el espectro de frecuencias registradas, calculando la frecuencia dominante.

Se han utilizado dos martillos en función del tamaño de la probeta, modelos 8204 y 8206-033, fabricados por Brüel & Kjær, con cabezales de 2 y 100 g respectivamente. Como se indica en el trabajo de [Sansalone y Carino \(1986\)](#) el tiempo de contacto del martillo sobre la probeta está relacionado con el diámetro del impacto, y a su vez de manera inversa con la frecuencia máxima. Así a menor tiempo de contacto mayor será el rango de frecuencias contenidas en el impulso, por lo que en un gran número de ocasiones se ha recurrido al martillo de menor tamaño. Éste presenta una punta de golpeo con un diámetro de 3 mm, por lo que se estima un tiempo de contacto $t_c \approx 15$ a $100 \mu s$, según la relación de tiempo de contacto - diámetro indicada por [Chang et al. \(2006\)](#) de $t_c = 0,0043 \phi$ ([Martínez Soto, 2013](#)).

Se ha utilizado también un acelerómetro piezoeléctrico Delta Tron modelo 4514-B-001 de la marca Brüel & Kjær, con tecnología TEDS (*transducer electronic data sheet*), capaces de crear una transmisión automática de datos del sensor, conocidos también como transductores inteligentes. El peso del acelerómetro es de 8,7 gramos, con un tamaño de 12 mm de diámetro. El acelerómetro recogerá la vibración mecánica que el martillo haya provocado en la probeta, convirtiéndolo en una señal eléctrica que se envía al analizador. En aquellas probetas que han presentado un comportamiento fuera de rango se ha utilizado de manera paralela un segundo acelerómetro modelo 4397 de Brüel & Kjær actuando como comparador de los datos aportados por el principal.

La sujeción del acelerómetro en la probeta se ha realizado mediante cera de abeja, dado el alto número de probetas y ensayos a realizar. El uso de la cera es perfectamente válido, actuando de una manera satisfactoria en un rango de frecuencias hasta a los 20 kHz. El único problema que el uso de la cera ha provocado es el despegue sobre el material terroso de la probeta, que quedaba demostrado al analizar la señal que llegaba al analizador. En esos casos se ha procedido a un cepillado superficial de la zona de contacto para eliminar la película exterior de la probeta antes de volver al acoplar el transductor. Dado el gran número de ensayos realizados el uso de pernos o discos adheridos quedó desestimado, ante los datos correctos aportados por el sistema de sujeción con cera.



(a) Ensayo FFRF sobre probeta

(b) Detalle de acelerómetro acoplado

Figura 8.3: Ensayo FFRF longitudinal sobre sub-probeta 11.2

El equipo utilizado se completa con un analizador-amplificador de las vibraciones aportadas por el acelerómetro, Pulse LAN XI modelo 3053-B-120 de 12 canales fabricado por Brüel & Kjær, y el software comercial Pulse v.16 instalado sobre un ordenador portátil, que servirá como procesador de datos e interfaz de comunicación con el personal que realiza el ensayo.

A este respecto se debe indicar que el personal que realiza el ensayo debe tener experiencia en la obtención de datos, ya que en algunas ocasiones se pueden excitar modos superiores de vibración, lo que hará que la lectura de los resultados sea más compleja. Otro problema se puede encontrar al aparecer dos frecuencias muy próximas, que Higuchi y Kesler (1954) atribuyen al hecho de que las probetas no mantengan el paralelismo en sus caras.

8.3. Obtención de datos mediante FFRF sobre probetas prismáticas

La toma de datos se inicia sobre el grupo de probetas prismáticas, ya que estas cumplen con las indicaciones de relación de longitud - sección indicadas por [Higuchi y Kesler \(1954\)](#) y [Jones \(1962\)](#) entre otros, con una relación de 4,4. Posteriormente se realizó una toma de datos sobre las series de probetas cúbicas, con los resultados que se exponen en el siguiente capítulo.

Sobre cada probeta se han realizado tres medidas en cada uno de los modos de vibración, calculando posteriormente el valor promedio de ellas. Cada una de las medidas a su vez supone el valor medio de entre ocho y doce golpes sobre la probeta, lo que supone que cada valor indicado es la media de entre 24 y 36 golpes de martillo sobre la probeta, en cada modo de vibración. A continuación se expondrán y analizarán los datos aportados por el programa PULSE v.16 para la probeta 1 en los tres modos de vibración, como ejemplo de la metodología seguida en el estudio, quedando todos los datos de las demás probetas incluidos en el apéndice D.

En el primero de los modos analizados, **modo transversal** (figura 8.4), se observa un claro pico en la frecuencia de valor 944 Hz sobre la gráfica que muestra los valores de autoespectro, siendo ésta la frecuencia propia de la probeta en ese modo. Trasladando ese dato a la ventana de cálculo de datos de resonancia, el programa indica que para esa frecuencia el factor de amortiguamiento (*damping ratio*) es de 0,862 %. Ambos datos se trasladan a una hoja de cálculo para la obtención del valor de $E_{din-transv}$ según se indica en la expresión (8.1). En este caso el valor aportado por el programa es la media de 8 golpes con el martillo sobre la probeta.

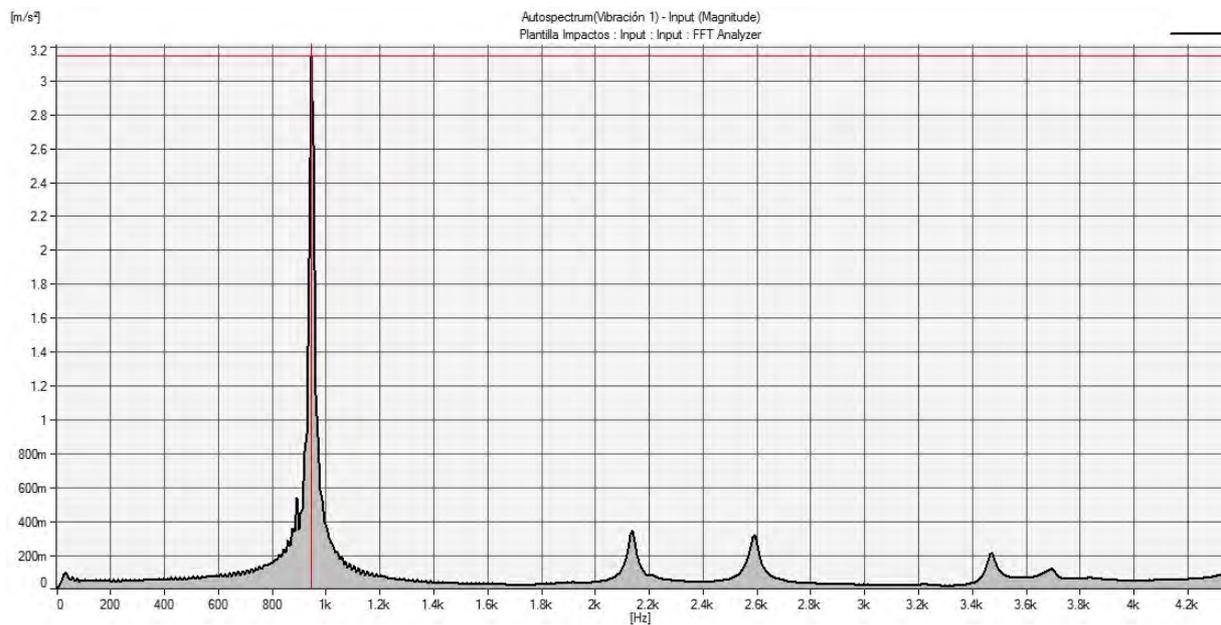
En la expresión (8.1) aparece un factor corrector T, que se obtiene de la tabla que aparece en la figura 8.2 y de la expresión (8.2), ya que se utiliza un valor de $\nu = 0,30$, al igual que se hizo al calcular los módulos de elasticidad dinámicos a partir de la UPV. El dato del factor de amortiguamiento (η) se debe tener en cuenta para poder calcular posteriormente el módulo de elasticidad estático, según la expresión (8.6) indicada por [Nagy \(1997\)](#).

$$E_D/E_S = 1 + \eta^{0,359} \quad (8.6)$$

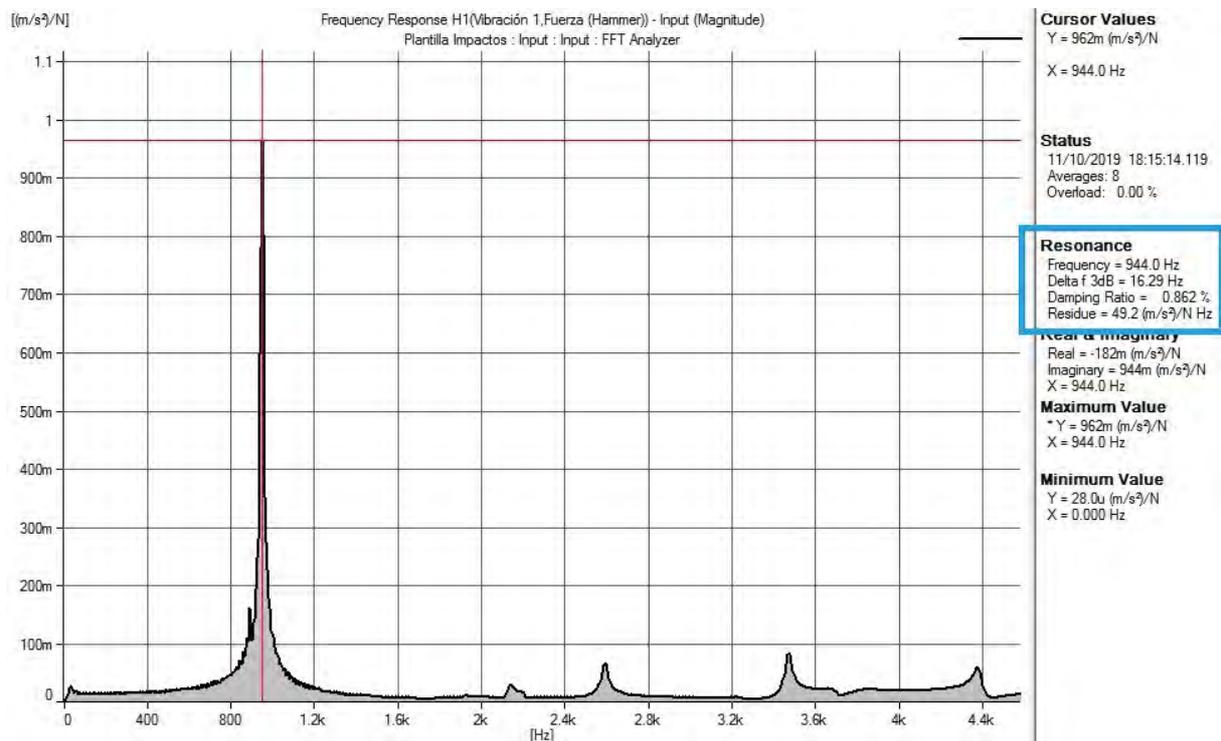
Las tres secuencias de golpes sobre la probeta devuelven el mismo valor de frecuencia de resonancia de 994 Hz, con tres valores distintos de factor de amortiguamiento, 0,853 %, 0,879 % y el que aparece en la figura 8.4 de 0,862 %. Por su parte el factor corrector T tiene un valor de 1,387, ya que el coeficiente de Poisson estimado es $\nu = 0,30$. Todos los datos de geometría y masa de la probeta se conocen previamente por lo que se puede calcular el valor de módulo de elasticidad dinámico transversal a partir de (8.1), con un resultado de $E_{din-transv} = 8094$ MPa.

El segundo de los modos que se analiza es el **modo longitudinal**, cuyos valores de resonancia y coeficiente de amortiguamiento aparecen en la figura 8.5. La transformada de Fourier marca un valor máximo para la frecuencia de 2200 Hz en cada una de las tres secuencias de golpes de martillo, siendo este por tanto el valor de la frecuencia de resonancia. Aparecen

otras dos frecuencias distanciadas un valor constante de 2,2kHz, sin que su presencia altere la consideración de la frecuencia de resonancia en el valor indicado.

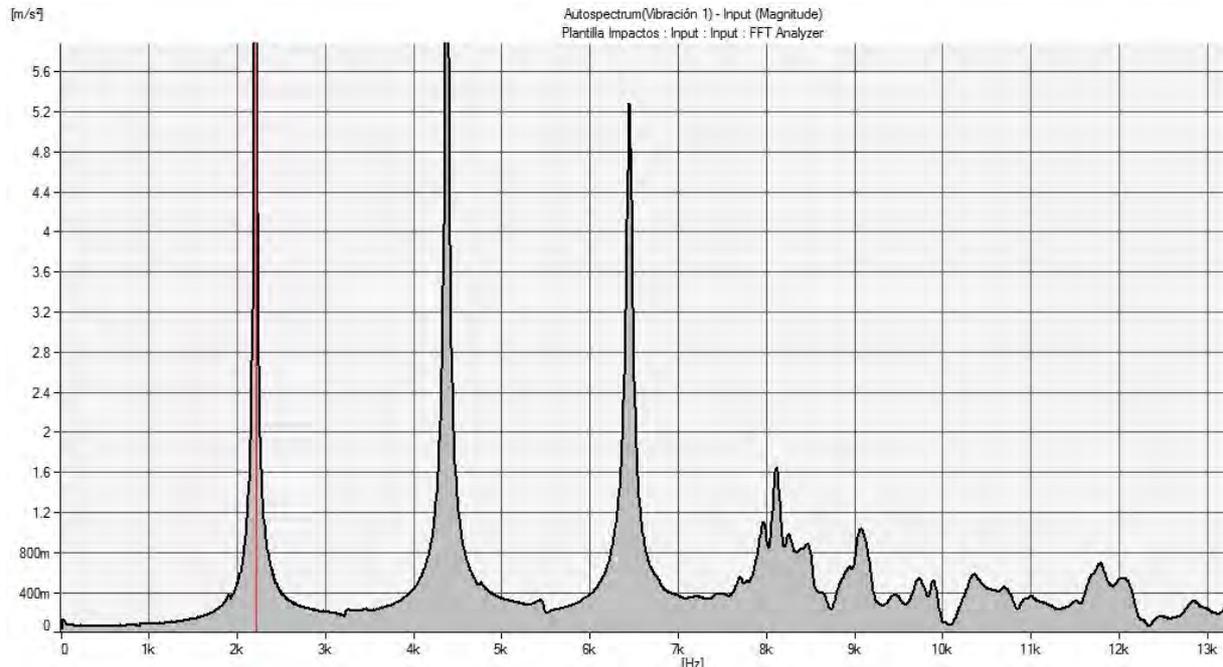


(a) Autoespectro probeta 1

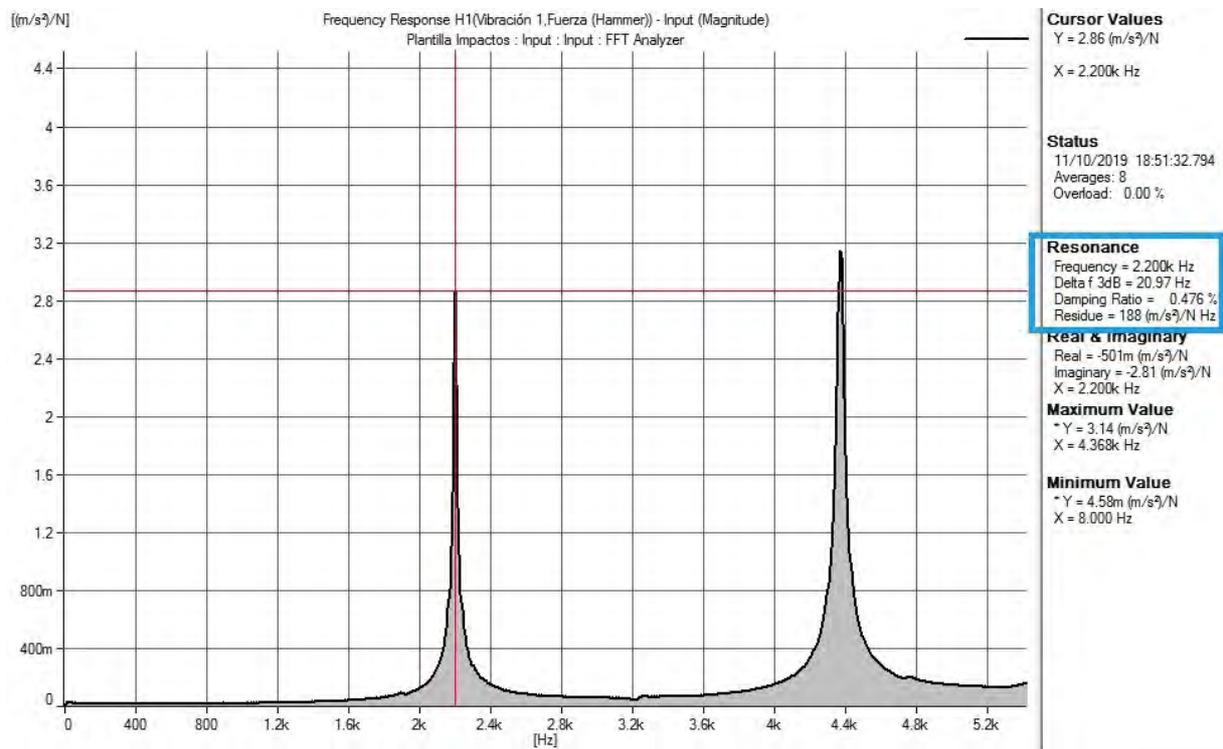


(b) Frecuencia de resonancia probeta 1

Figura 8.4: Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo transversal de probeta 1

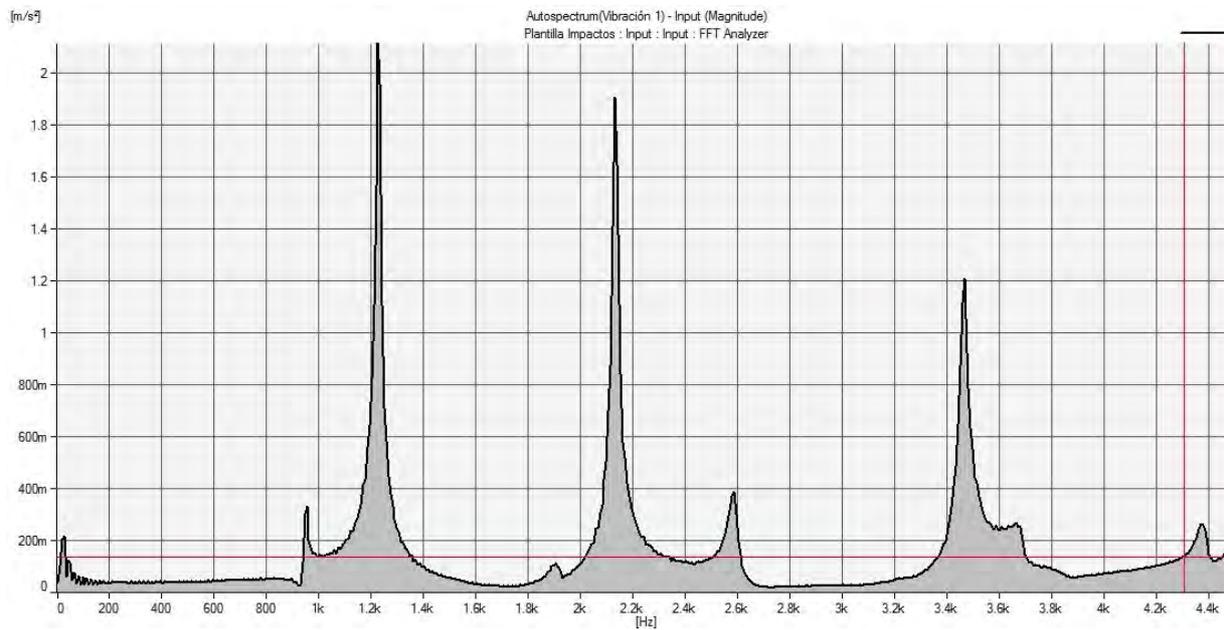


(a) Autospectro probeta 1

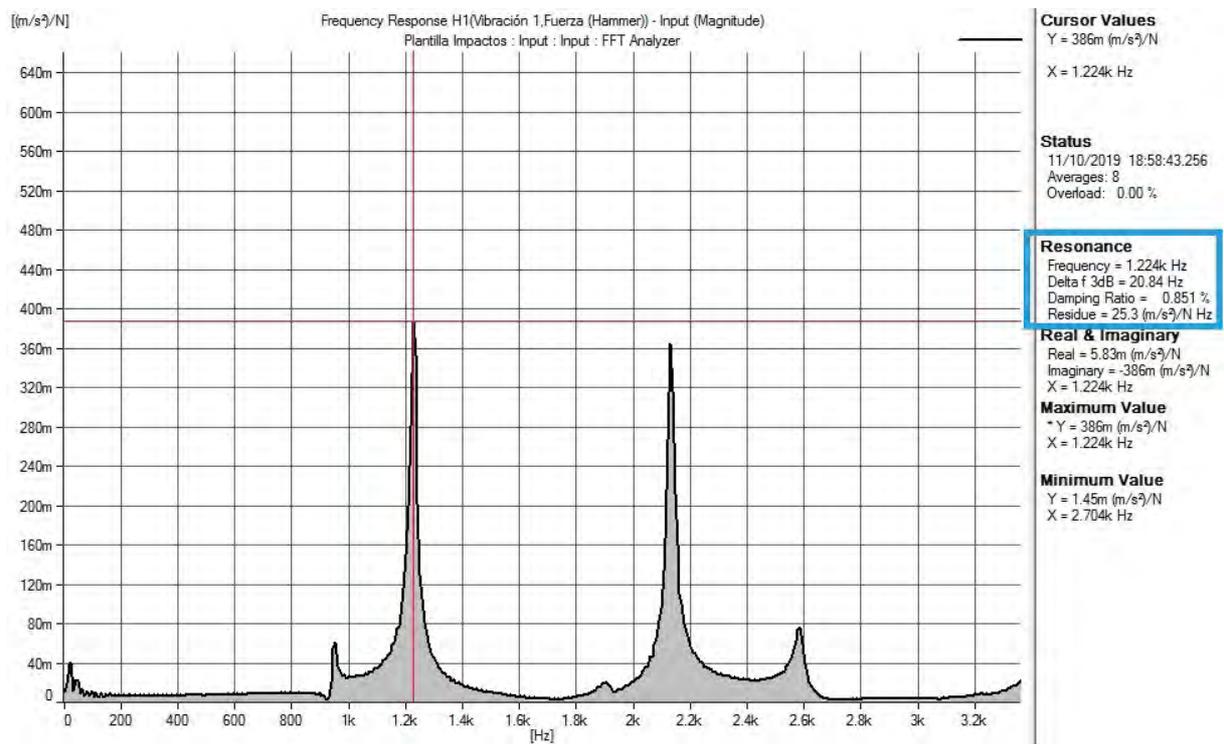


(b) Frecuencia de resonancia probeta 1

Figura 8.5: Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo longitudinal de probeta 1



(a) Autospectro probeta 1



(b) Frecuencia de resonancia probeta 1

Figura 8.6: Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo torsional de probeta 1

En este caso los valores de amortiguamiento son 0,482 %, 0,479 % y 0,476 %, siendo este último valor el que aparece en la figura 8.5. El cálculo de módulo de elasticidad a partir del modo longitudinal de vibración no requiere de más valores que la frecuencia de resonancia, las características geométricas y la masa, por lo que a partir de la expresión (8.3) se obtiene un valor de $E_{din-long} = 7546$ MPa.

El tercero de los modos de vibración que se excita en las probetas es el **modo torsional**. Siguiendo con el análisis de los datos obtenidos de la probeta 1, como ejemplo del trabajo realizado sobre las restantes probetas, se puede ver cómo en la figura 8.6 se marca una frecuencia de resonancia en el valor de 1224 Hz, siendo el mismo valor el que se obtiene de las tres secuencias de golpeo con el martillo. Los valores calculados de factor de amortiguamiento son 0,829 %, 0,813 % y 0,851 %, siendo este último valor el que se muestra en la figura indicada.

En este caso, además de los datos geométricos y masa de la probeta se incluye un factor de forma en la expresión (8.4) de valor fijo 1,183 para secciones cuadradas. Como ya se ha indicado al hablar de la ejecución de las probetas, el tamaño de éstas es variable debido a las propias condiciones impuestas durante el estudio. Por ese motivo el valor del factor de forma se calcula mediante la expresión indicada, dando un valor en el caso de la probeta 1 de 1,177. Con todos estos datos se puede obtener el valor del módulo de rigidez transversal dinámico de la probeta 1, siendo de $G_{din-torsin} = 2751$ MPa.

En la tabla 8.1 se recogen a modo de resumen los datos finales obtenidos sobre las doce probetas prismáticas, indicando las frecuencias propias obtenidas según los modos de vibración transversal, longitudinal y torsional, así como los módulos de elasticidad y rigidez transversal dinámicos. Todos los datos y valores obtenidos de las doce probetas prismáticas se pueden consultar en el apéndice F. También aparecen los valores de módulo de elasticidad dinámico obtenidos mediante UPV en el capítulo anterior.

Probeta	Frec. transv. (Hz)	$E_{din-transv}$ (MPa)	Frec. longitud. (Hz)	$E_{din-long}$ (MPa)	Frec. torsional (Hz)	G_{din} (MPa)	$E_{din-UPV}$ (MPa)
P-1	944	8094	2200	7546	1224	2751	5895
P-2	808	6123	1912	5709	747	1028	4465
P-3	864	7047	2107	6924	864	1377	5092
P-4*	792	5523	1936	5710	784	1102	4189
P-5*	573	2911	1299	2573	693	863	4254
P-6*	888	7559	2096	6980	880	1454	5385
P-7	816	6162	1989	6203	1208	2697	4673
P-8	800	6104	1984	6258	1232	2848	4590
P-9	888	7625	2195	7751	1344	3431	4803
P-10	872	7583	2109	7174	1296	3207	5851
P-11	872	7268	2120	7140	1112	2321	5411
P-12	920	8251	2200	7737	1363	3508	6117

Tabla 8.1: Resumen de datos obtenidos mediante FFRF sobre probetas prismáticas

Se han marcado tres probetas (P-4, P-5 y P-6) en la tabla 8.1, todas ellas de la dosificación 3:1, cuyos resultados necesitan ser discutidos a partir de las figuras que aparecen en el apéndice

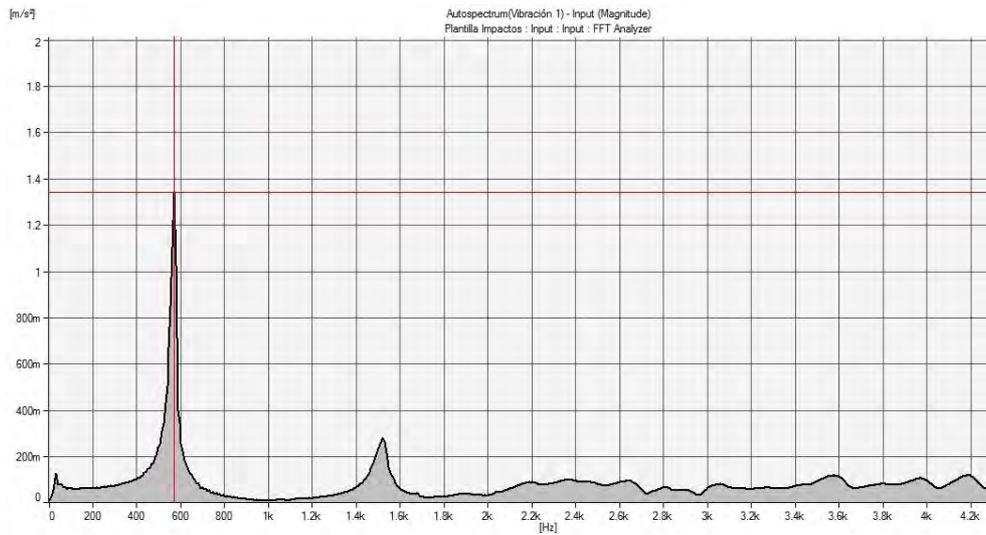
D. Así, los datos que se recogen del ensayo de excitación torsional de la probeta P-4 marca un valor máximo de resonancia de 1800 Hz, siendo este un dato con una gran diferencia sobre el resto de frecuencias excitadas. Aún así el valor de la primera frecuencia excitada sería de 784 Hz, con un amortiguamiento medio de 0,985 %. Si se utiliza el dato de 1800 Hz indicado, el valor de módulo de rigidez transversal sería de 5810 MPa, lo que supondría un valor superior a los módulos de elasticidad, por lo cual se entiende que no sería válido.

Algo parecido se puede indicar respecto de la probeta P-6, donde el valor de frecuencia de resonancia en el modo torsional que aparece en las figuras del apéndice D marca un pico de valor 2005 Hz. Como en el caso anterior, se puede observar que se excitan varios modos, manteniendo como valor de cálculo la primera de las frecuencias excitadas, 880 Hz, con un amortiguamiento medio de 0,969 %. Si se utilizara el dato de 2005 Hz el valor de G_{din} sería de 7548 MPa, siendo por tanto igual o superior a los valores de módulos de elasticidad dinámicos.

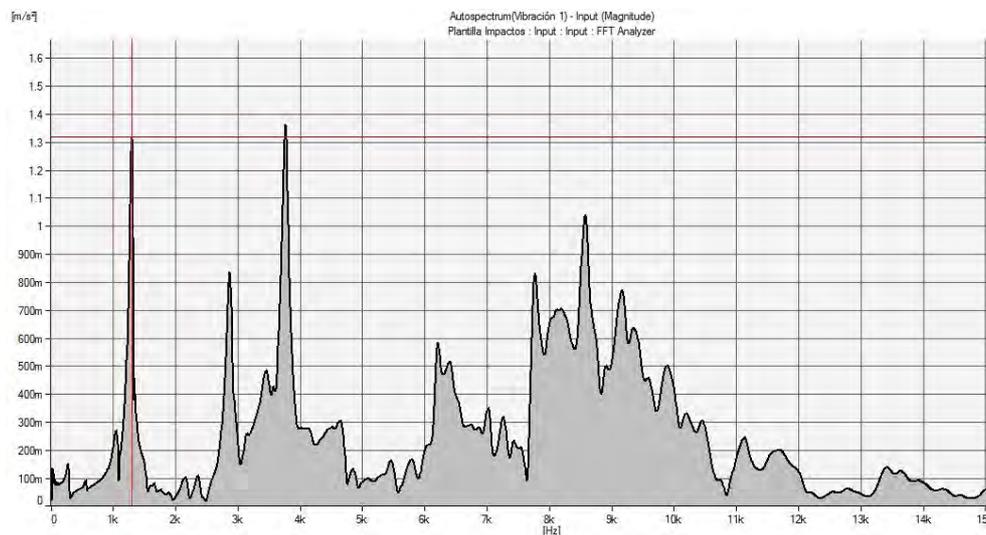
Finalmente la probeta P-5 presenta valores de frecuencia de resonancia inferiores a la media en los tres modos de vibración. Así el valor de resonancia para el modo transversal es de 573 Hz, frente a los 859 Hz que supondría la media de los otros cinco valores de las probetas de su misma dosificación. Esto supone una disminución en torno a un 33 %. Algo parecido ocurre en el modo longitudinal, con un valor de 1299 Hz frente a los 2050 Hz de media de las otras probetas, lo que correspondería con un descenso en torno al 36 %. El mismo efecto se produce para el modo torsional, con un descenso cercano al 23 %. Esta disminución en los datos indica que esta probeta no se comporta de igual forma que el resto, por lo que se convierte en un caso atípico. En los siguientes capítulos se analizará de forma particular su comportamiento, al igual que se ha venido haciendo con la probeta 11 de las series de probetas cúbicas.

Además de los datos indicados, si se observan los autoespectros de la probeta P-5 que se indican en la figura 8.7 se puede llegar a entender lo que quizás esté sucediendo en la probeta. En la primera de las imágenes, 8.7(a), que muestra la frecuencia en modo transversal, se observa como la señal es *limpia*, con un pico muy claro en la frecuencia de 573 Hz, y con algo de ruido a partir de los 1,5 kHz. Hasta este momento la señal puede indicar un valor bajo, pero poco más sobre la propia probeta. Es al revisar la segunda imagen de la figura 8.7, marcada como (b) y que se corresponde con el modo longitudinal de vibración, cuando se observa una gran cantidad de interferencias y una señal muy intervenida por modos superiores de vibración, con un perfil muy marcado. Esta imagen ya empieza a indicar que, al margen del valor en sí de la frecuencia de resonancia, la probeta puede estar dañada interiormente. Finalmente, al analizar la señal del tercer modo de vibración, figura 8.7(c), modo torsional, vemos como la frecuencia de resonancia marca valores similares a las demás probetas, pero el perfil es poco claro, sinuoso, apareciendo también una gran cantidad de frecuencias resonantes.

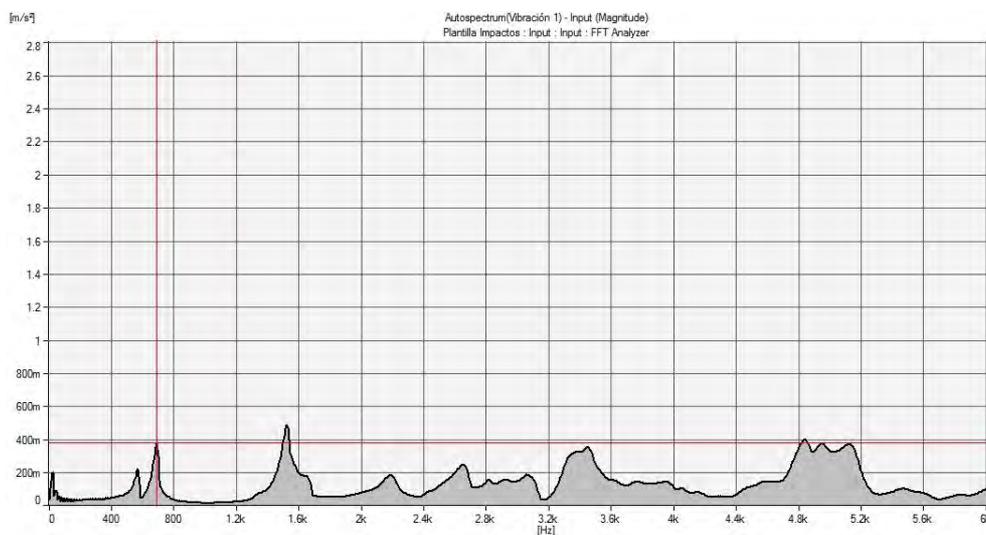
En cambio al analizar los datos que se recogieron durante los ensayos de UPV, y que aparecen en la tabla 7.4, no se observa una variación sustancial respecto a los datos del resto de probetas. Por tanto, la frecuencia en modo transversal y el valor de la UPV son considerados como ensayos válidos, al margen de sus valores comparados con las demás probetas. Si se recuerda que el material ensayado es un tapial y que por tanto su sistema constructivo es a base de tongadas se puede estar más cerca de encontrar la causa de esta discrepancia de datos y de las señales tan confusas de los autoespectros.



(a) Modo de vibración transversal



(b) Modo de vibración longitudinal



(c) Modo de vibración torsional

Figura 8.7: Frecuencias de resonancia en los tres modos de vibración de probeta 5

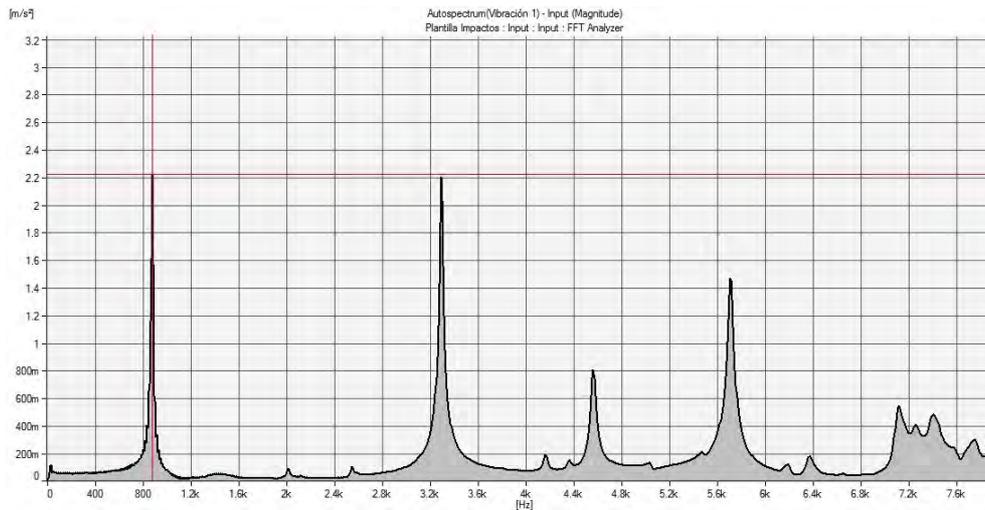
El proceso constructivo a base de tongadas puede ocasionar la aparición de fisuras que provoquen que las probetas presenten problemas de laminación. Esta laminación originará una falta de conexión entre dos tongadas sucesivas, quedando por tanto la probetas dividida longitudinalmente. Al revisar la cara exterior de la probeta P-5 no se encontraron fisuras de importancia, o al menos no superiores a las que aparecieron en otras probetas que tuvieron un comportamiento correcto, como la sub-probeta cúbica ssP 9.1.1 que aparece en la figura 8.8.

Este proceso de laminación no afectaría a la UPV, siempre y cuando el plano de laminación no se encuentre a media altura del canto de la probeta (zona donde se colocan los palpadores), lo que en principio habría interferido en la lectura de UPV. Si se marca una altura de laminación de 6,5 cm a contar desde la cara superior de la probeta, se estaría trabajando con un sólido de 440 mm de longitud, 65 mm de canto y 100 mm de anchura, con una masa de aproximadamente 5973. Al introducir esos datos en la expresión (8.1) junto con la frecuencia obtenida de 573 Hz, se obtiene un valor de módulo de elasticidad dinámico transversal de 6476 MPa, un valor que difiere apenas en un 5 % sobre la media de los obtenidos por el resto de probetas de su dosificación. Es por tanto muy posible que la probeta prismática 5 sufra un proceso interno de laminación, que de hecho se puso de manifiesto en el ensayo de fractura, como se comentó en el capítulo 6.

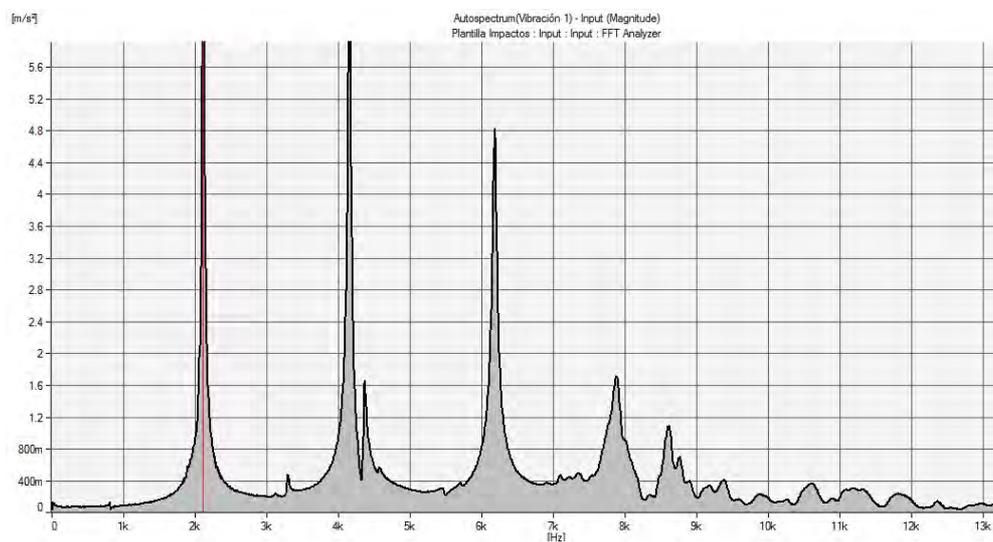


Figura 8.8: Vista en detalle de la cara exterior de la sub-probeta cúbica ssP 9.1.1

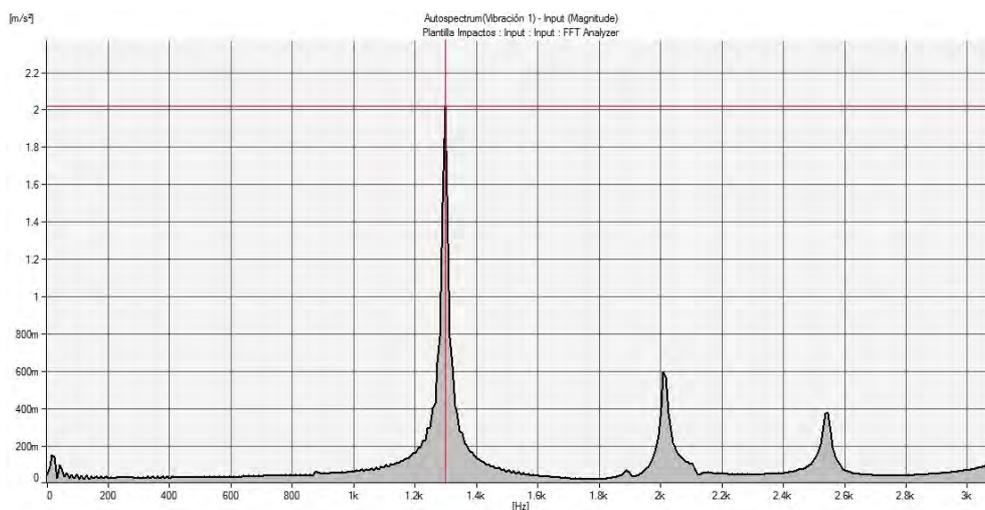
Si se comparan ahora los resultados de frecuencias de resonancia obtenidos en función de la dosificación se comprueba como no aparecen diferencias importantes en los modos de vibración transversal y longitudinal (4 al 7 % de incremento). Sí son en cambio apreciables las diferencias en el modo torsional, salvo la probeta P-1 (de dosificación 3:1) que presenta valores más cercanos al grupo de probetas de dosificación 4:1. De manera general las probetas de dosificación 4:1 han presentado un comportamiento más sólido, con valores de resonancia más claros. Como ejemplo del comportamiento de las probetas de dosificación 4:1 se muestra en la figura 8.9 las frecuencias obtenidas en los tres modos de vibración sobre la probeta P-10. Como se puede observar en dicha figura en los tres modos la posición de la frecuencia de resonancia es muy clara, con valores de 872 Hz, 2109 Hz y 1296 Hz respectivamente para el modo transversal, longitudinal y torsional.



(a) Modo de vibración transversal

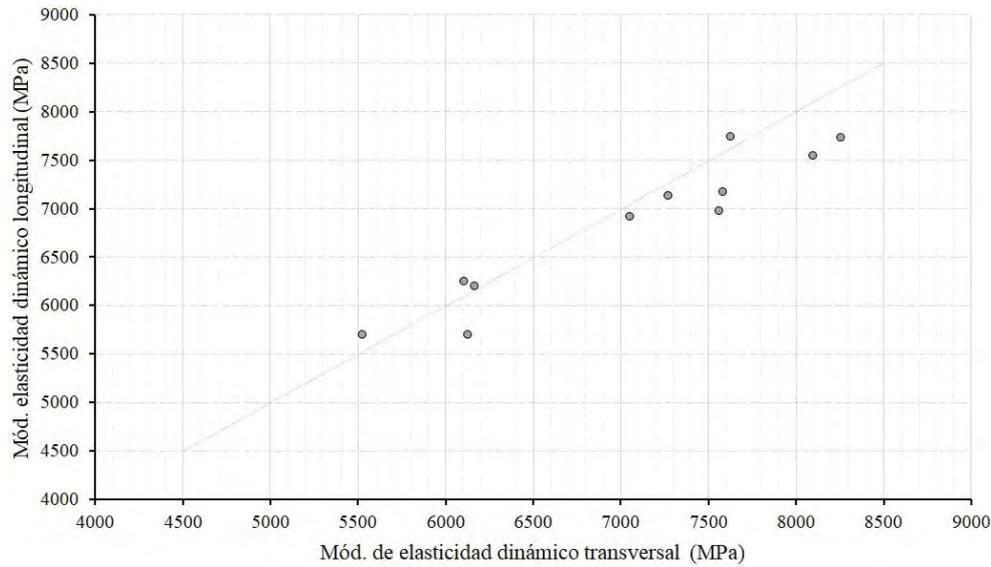


(b) Modo de vibración longitudinal

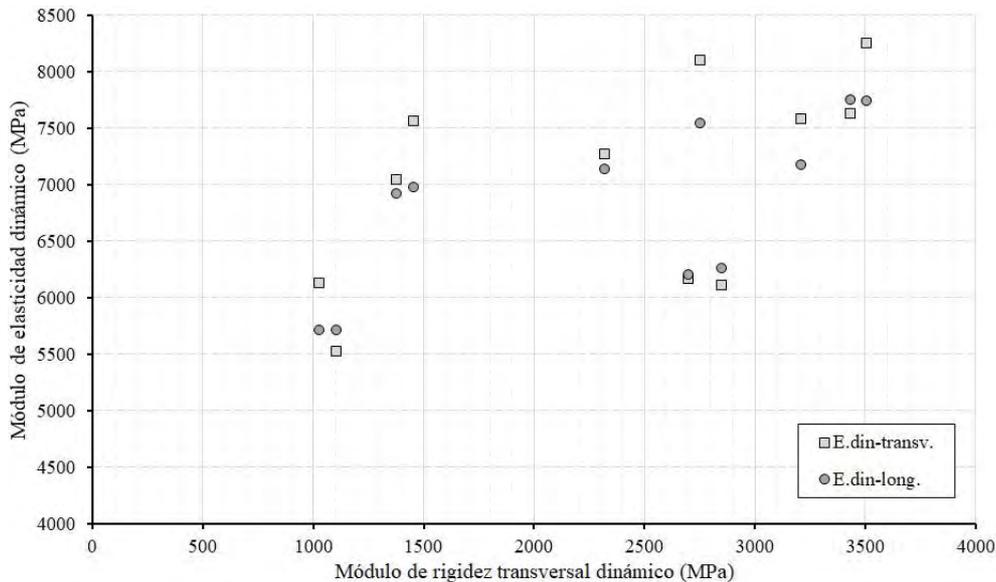


(c) Modo de vibración torsional

Figura 8.9: Frecuencias de resonancia en los tres modos de vibración de probeta P-10



(a) Relación entre módulos dinámicos de elasticidad transversal y longitudinal



(b) Relación entre módulos dinámicos de elasticidad y de rigidez transversal dinámico

Figura 8.10: Relaciones entre módulos de elasticidad dinámicos y módulo de rigidez transversal dinámico en probetas de tapial

En la figura 8.10 se representan las relaciones que se pueden encontrar entre los valores de los módulos de elasticidad dinámicos entre sí y con el módulo de rigidez transversal. En la primera de ellas (figura 8.10 a) se observa como existe una gran estabilidad entre los modos transversal y longitudinal, con una relación entre ellos cercana a 1. Así se puede comprobar en la figura 8.11 donde se han representado los valores del cociente de ambos módulos de elasticidad dinámicos de cada una de las probetas. Destaca el valor de la probeta P-5 que vuelve a dar un resultado que anuncia que su estado no es correcto. Por otra parte, en la figura 8.10 b, se indican los puntos de relación entre los módulos de elasticidad de los dos modos anteriores con el módulo de rigidez transversal dinámico.

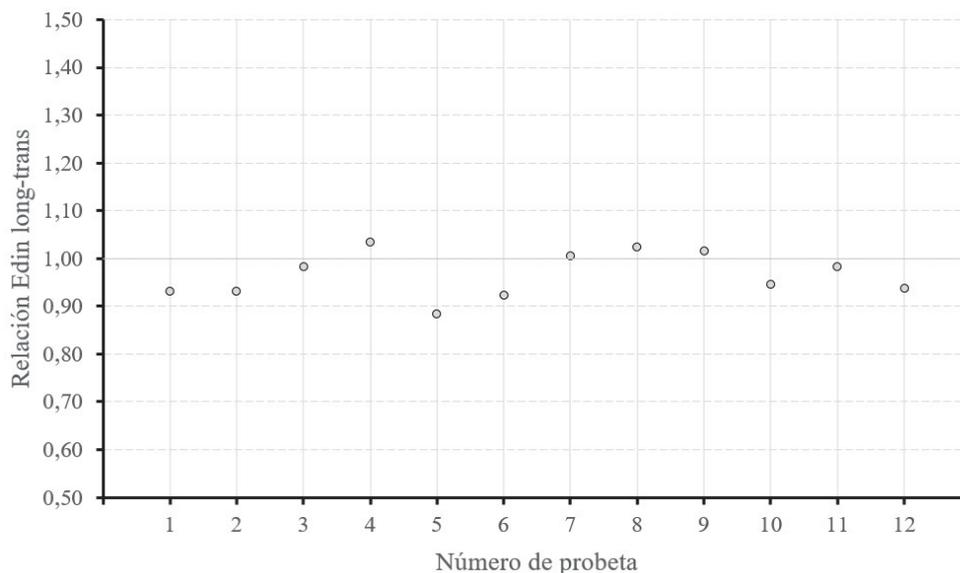


Figura 8.11: Relación entre módulos de elasticidad dinámicos y de rigidez transversal dinámico en función de la dosificación. Probetas prismáticas

En este caso los valores comienzan a tener una relación menos marcada que en el caso anterior. Hay que recordar que si bien los valores de los módulos elásticos de las dos dosificaciones son muy parecidos, los módulos de rigidez transversal de las probetas de dosificación 3:1 presentan una notable diferencia respecto de las de dosificación 4:1.

Si se dividen las dos dosificaciones dentro de la misma figura (fig.8.12) se puede observar como quedan claramente separadas en dos grupos, con los mayores valores para las probetas de dosificación 4:1. En la figura 8.12 no se ha incluido los valores de la probeta P-5, por las razones expuestas anteriormente. El primero de los grupos, dosificación 3:1, presenta una relación en torno a 0,24 entre los módulos dinámicos de rigidez transversal y elásticos, mientras que el segundo grupo de probetas, con dosificación 4:1, llega a una relación 0,4 entre ambos módulos dinámicos.

Esta diferencia entre las dosificaciones sólo se aprecia en los valores de G_{din} , sin que se hayan observado tampoco en los valores de UPV calculados anteriormente. La explicación a este fenómeno debe estar relacionada con la forma de vibración excitada en el modo torsional, y su relación con el sistema constructivo por tongadas o con la carbonatación. El efecto de la carbonatación, como se verá al final del documento en el capítulo 9, afecta en mayor medida a las caras exteriores de la probeta que al núcleo, provocando un endurecimiento superficial a modo de costra en las probetas. Este efecto y su consecuencia de endurecimiento puede ser la causa de esta diferencia en los datos obtenidos, ya que el modo torsional de vibración moviliza principalmente el material exterior de la probeta.

Sobre la relación entre los valores de los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos mediante FFRF y los obtenidos mediante UPV se puede indicar que presentan relaciones muy estables como se puede ver en las figuras 8.13 y 8.14, con un factor entre 0,70 y 0,80 entre los dos métodos de ensayos no destructivos. Destaca, una vez más, los valores de la probeta P-5,

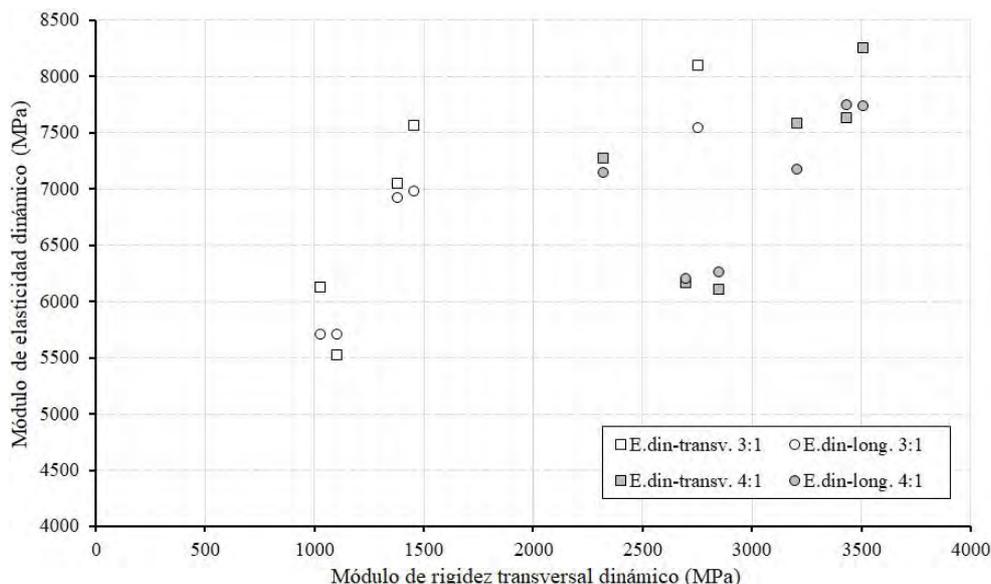


Figura 8.12: Relación entre módulos de elasticidad dinámicos y de rigidez transversal dinámico en función de la dosificación. Probetas prismáticas

que se alejan notablemente del valor de relación 0,75, con valores de 1,46 y 1,65 para los modos transversal y longitudinal respectivamente. En el capítulo 11 se analizan los valores del factor de correlación entre los datos aportados directamente por los ensayos FFRF y UPV, módulo de elasticidad dinámico - velocidad.

Como último punto en el análisis de los datos aportados por los ensayos de frecuencia resonancia se obtiene el valor de los módulos de elasticidad estáticos de las probetas, a partir de los módulos de elasticidad dinámicos y del factor de amortiguamiento medio, según se indica en la expresión (8.6). Del mismo modo se calculan los coeficientes de Poisson, a partir de los valores dinámicos de módulo de elasticidad y rigidez transversal indicados en la expresión (8.5). En la tabla 8.2 aparecen los valores estáticos calculados.

Probeta	$E_{din-transv}$ (MPa)	Amortig. η	$E_{s-transv}$ (MPa)	$E_{din-long}$ (MPa)	Amortig. η	E_{s-long} (MPa)	G_{din} (MPa)	Amortig. η	G_s (MPa)	ν_{trans}	ν_{long}
P-1	8094	0,009	6849	7546	0,005	6579	2751	0,008	2333	0,40	0,37
P-2	6123	0,010	5131	5709	0,009	4830	1028	0,017	836	-	-
P-3	7047	0,010	5922	6924	0,005	6010	1377	0,009	1162	-	-
P-4	5523	0,010	4616	5710	0,010	4794	1102	0,010	926	-	-
P-5	2911	0,020	2340	2573	0,023	2046	863	0,022	689	0,69	0,49
P-6	7559	0,009	6404	6980	0,009	5884	1454	0,010	1222	-	-
P-7	6162	0,009	5219	6203	0,005	5404	2697	0,008	2291	0,14	0,15
P-8	6104	0,008	5186	6258	0,006	5414	2848	0,007	2429	0,07	0,10
P-9	7625	0,006	6587	7751	0,006	6696	3431	0,011	2863	0,11	0,13
P-10	7583	0,009	6402	7174	0,005	6259	3207	0,007	2747	0,18	0,12
P-11	7268	0,009	6130	7140	0,005	6233	2321	0,010	1950	0,57	0,54
P-12	8251	0,009	7026	7737	0,005	6761	3508	0,007	3006	0,18	0,10

Tabla 8.2: Valores de módulos estáticos a partir de dinámicos en probetas prismáticas

Todos los factores de amortiguamiento se sitúan entre el 0,5 % y el 1 %, salvo puntualmente el valor del modo torsional de la probeta P-2, que está en el 1,7 %. Saltan a la vista los valores

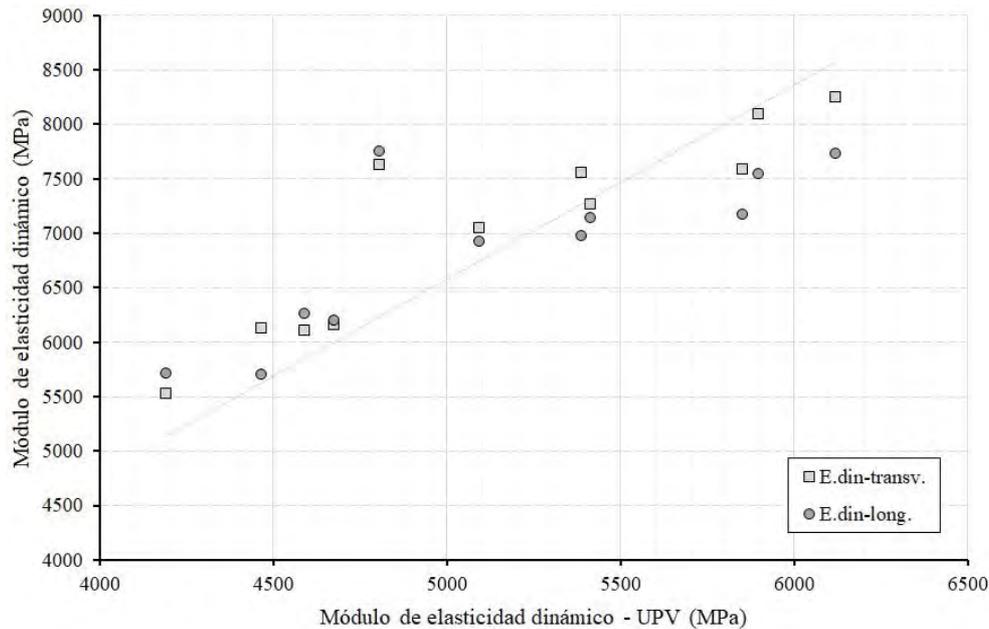


Figura 8.13: Relación entre módulos dinámicos de elasticidad obtenidos mediante FFRF y UPV. Probetas prismáticas

de la probeta P-5, sobre la que se ha discutido anteriormente. Estos valores son más del doble de los valores medios del resto de probetas, lo que nuevamente indica que la probeta presenta algún tipo de irregularidad interna. Como se aprecia, no existen diferencias en los valores obtenidos en las distintas dosificaciones, con valores medios de 5952 MPa y 5897 MPa para los modos transversal y longitudinal respectivamente, sin contar con el dato anómalo de la probeta P-5. Además, de los datos de esta tabla se puede extraer otra conclusión al calcular la relación entre los módulos estáticos y los dinámicos, con un valor medio en cada modo de vibración entre 0,84 y 0,86.

Al calcular el coeficiente de Poisson de las probetas de dosificación 3:1 se obtienen valores incoherentes en algunas de ellas, con otros que oscilan entre 0,40 a 0,69 y 0,37 a 0,49 en función del modo utilizado, lo que nos estaría indicando que el material de las probetas es altamente deformable. Por su parte, las probetas de dosificación 4:1 proporcionan un valor medio de 0,21 para el modo transversal y 0,19 para el longitudinal, datos que pueden acercarse a la realidad, si bien difieren mucho de los obtenidos en la otra dosificación, presentando además una dispersión importante.

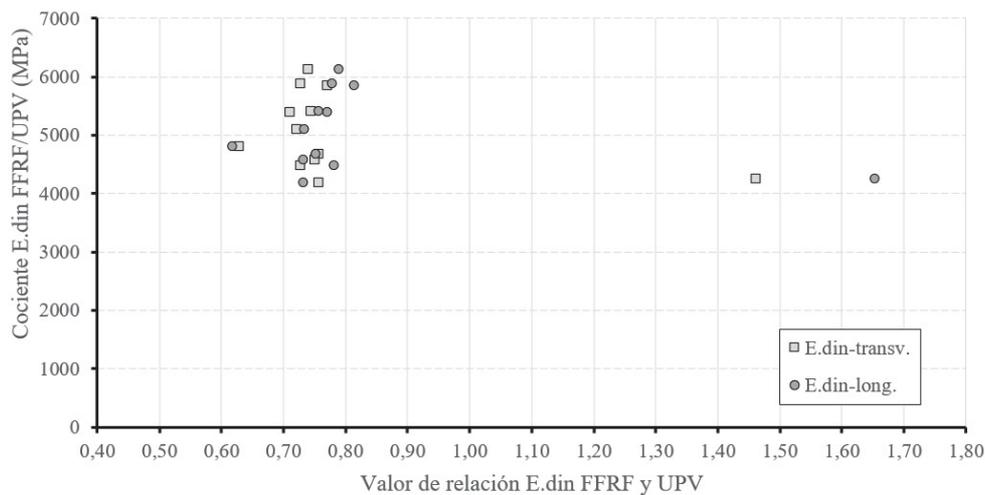
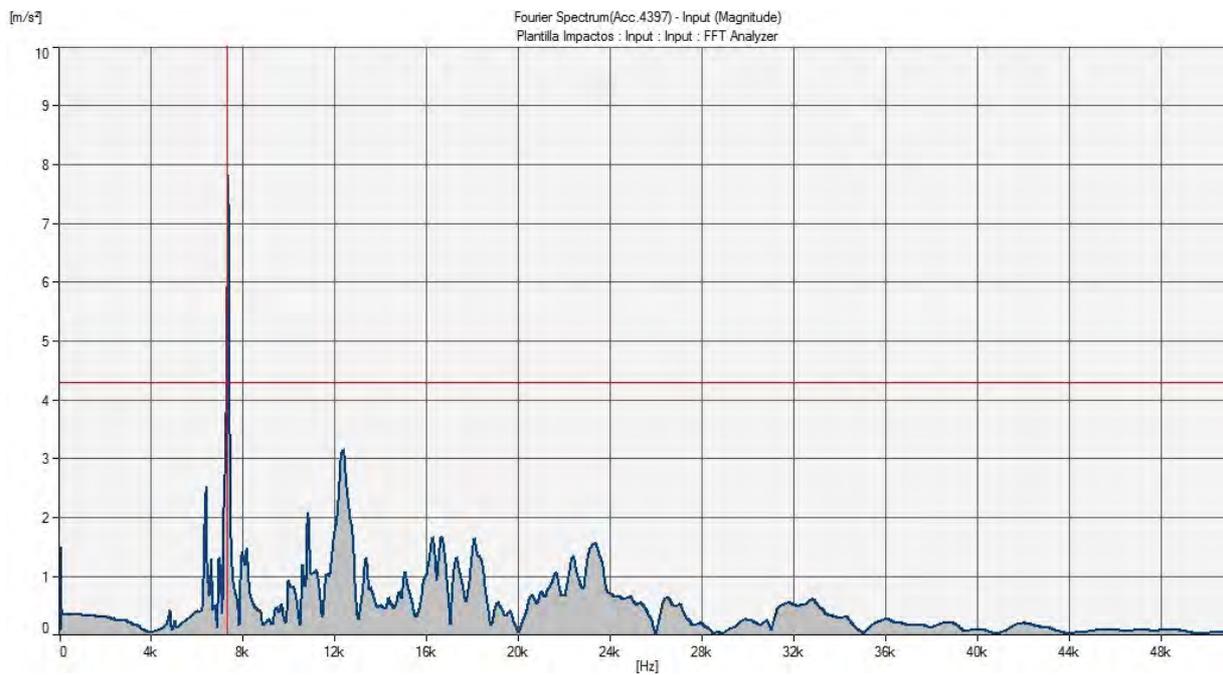


Figura 8.14: Factor de relación entre módulos dinámicos de elasticidad obtenidos mediante FFRF y UPV. Probetas prismáticas

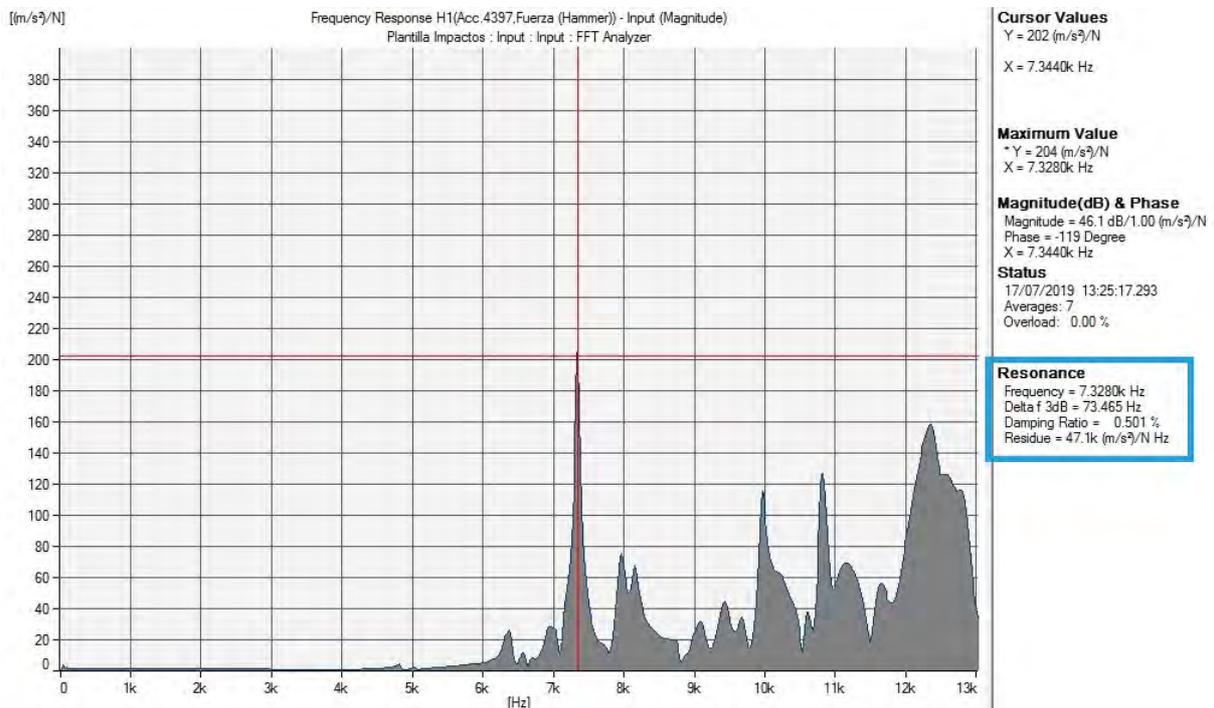
8.4. Obtención de datos mediante FFRF sobre probetas cúbicas

En este capítulo se exponen los resultados de los ensayos realizados sobre probetas cúbicas para obtener su caracterización mecánica mediante el método FFRF. El esquema de trabajo seguido es similar al indicado para las probetas prismáticas. Las probetas cúbicas se han fabricado para obtener datos a partir de los ensayos de UPV y destructivos, si bien se decide realizar sobre ellas una campaña de toma de datos mediante FFRF para comprobar las dificultades que este método presenta al ser aplicado sobre sólidos con una relación muy baja entre su sección y su longitud, como ya indican Higuchi y Kesler (1954) o Jones (1962) entre otros. La toma de datos se ha aplicado a las seis primeras series de probetas, tomando nuevamente tres medidas en cada uno de los modos de vibración para calcular posteriormente el valor promedio de ellas, al igual que se hizo en las probetas prismáticas. Por tanto, del mismo modo que en el caso anterior, el valor indicado es el valor medio de una serie entre ocho y doce golpes sobre la probeta, por lo que el número de ocasiones en las que la probeta es excitada asciende a unas 24 a 36 veces en cada uno de los tres modos.

A continuación analizarán los datos de la probeta 3.3 aportados por el programa, en los tres modos de vibración. Se elige esta probeta por haber presentado uno de los comportamientos más claros de todas las probetas cúbicas analizadas. Todos los datos de las demás series de probetas pueden ser consultados en el apéndice E. En las figuras 8.15 a 8.17 se pueden ver los valores de frecuencia de resonancia y amortiguamiento de la probeta 3.3 en los tres modos de vibración. Así en la primera de la figura, que representa el espectro de Fourier del modo transversal, se observa como existe un valor dominante en el entorno de los 7328 Hz, con un valor de coeficiente de amortiguamiento del 0,501 %. En este caso el valor de la frecuencia propia obtenida está claramente separado del resto de frecuencias que existen en la secuencia, por lo que se puede entender que el valor posteriormente calculado mediante la expresión (8.1) será un valor fiable.

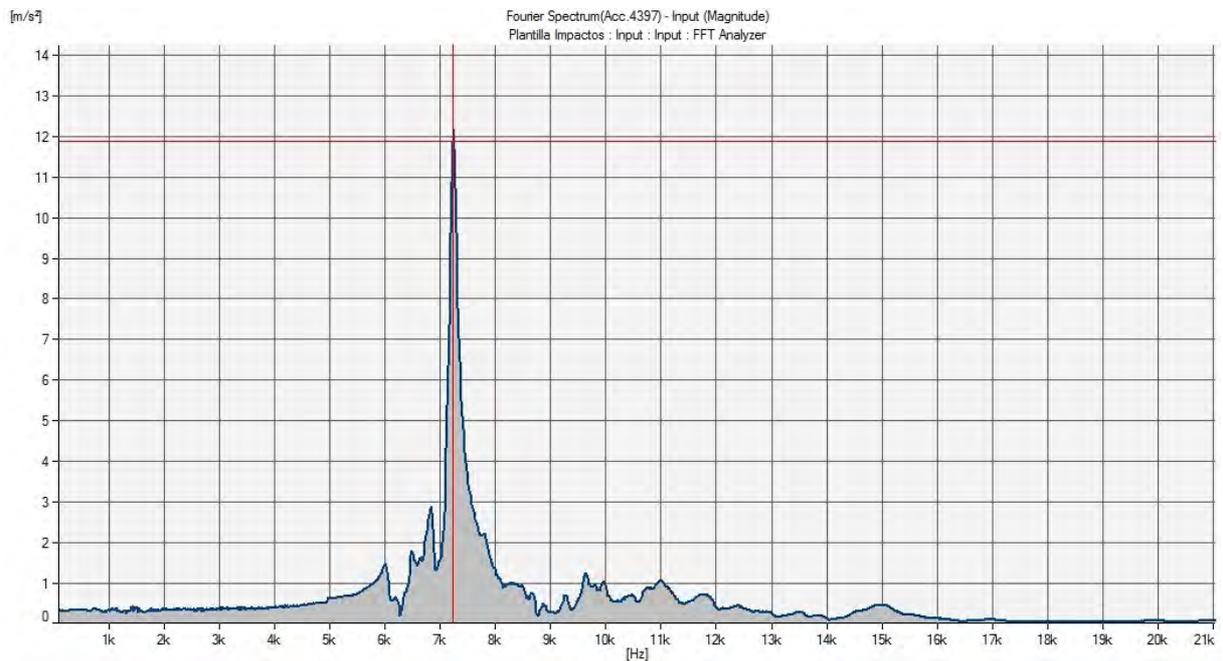


(a) Autoespectro probeta 3.3

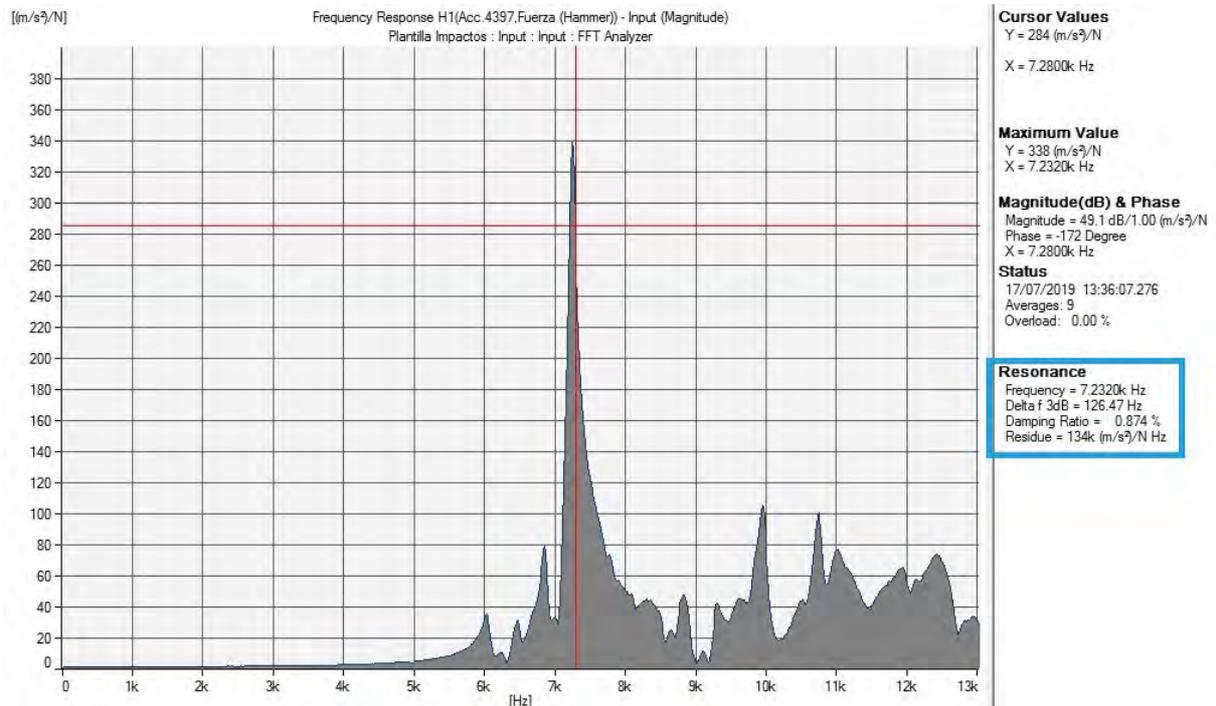


(b) Frecuencia de resonancia probeta 3.3

Figura 8.15: Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo transversal de probeta 3.3

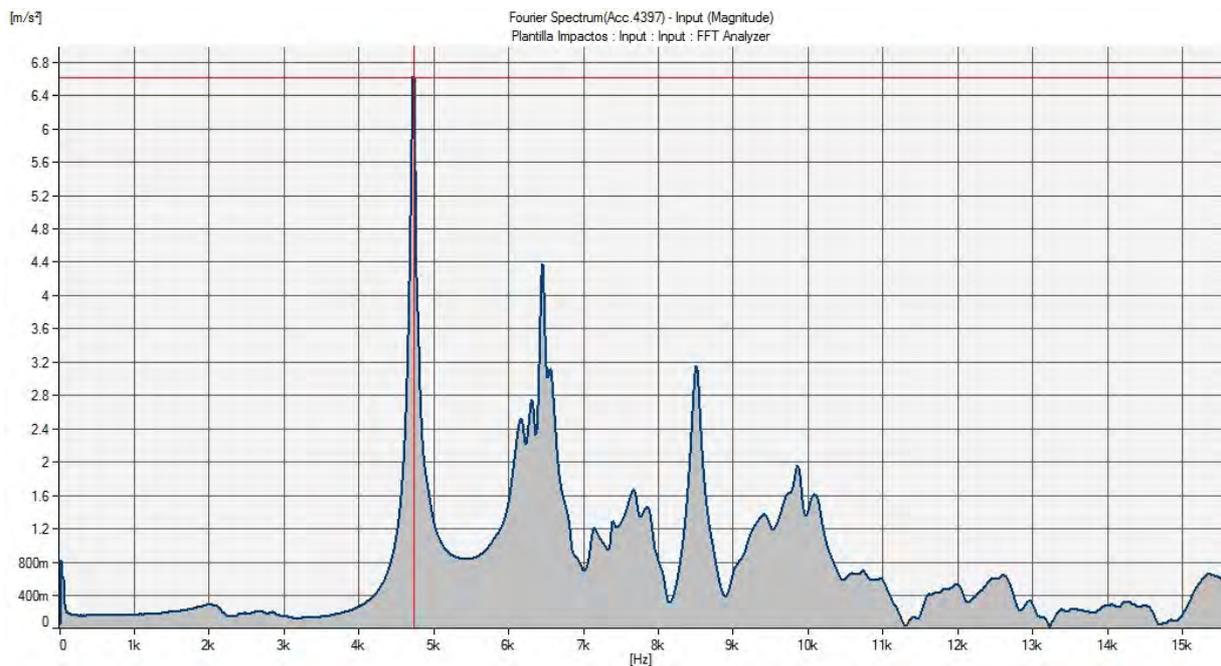


(a) Autoespectro probeta 3.3

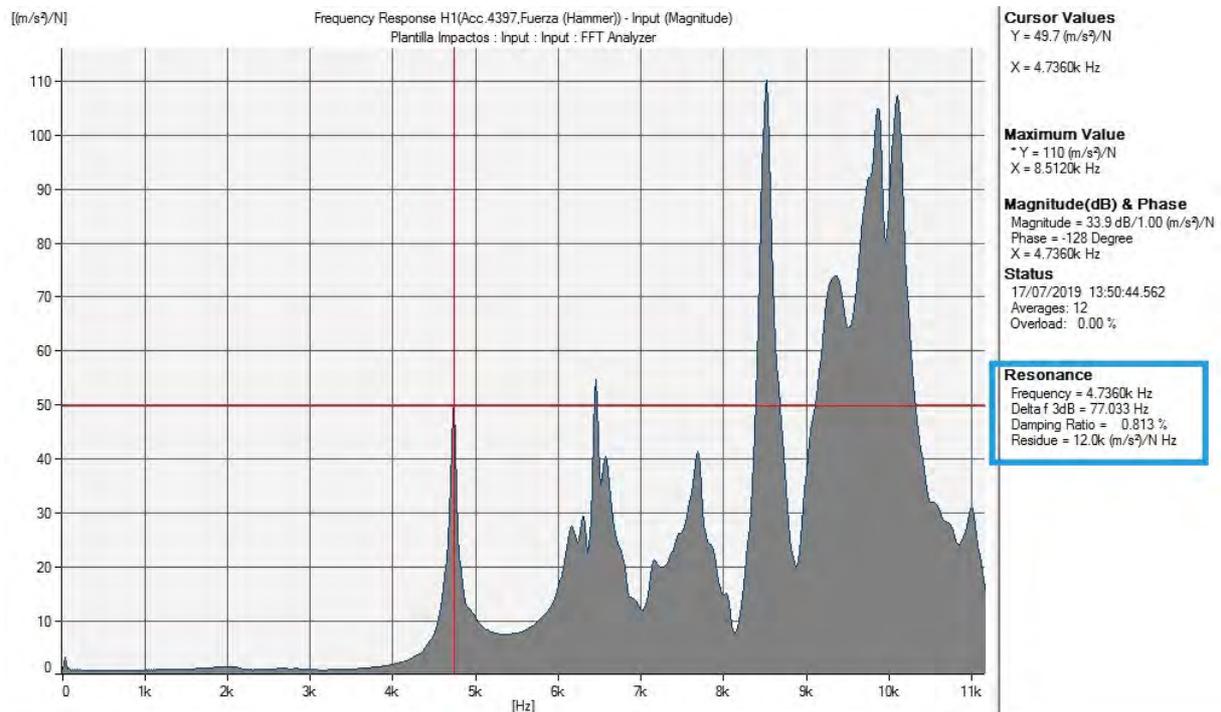


(b) Frecuencia de resonancia probeta 3.3

Figura 8.16: Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo longitudinal de probeta 3.3



(a) Autoespectro probeta 3.3



(b) Frecuencia de resonancia probeta 3.3

Figura 8.17: Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo torsional de probeta 3.3

Por su parte en la figura 8.16, correspondiente al modo longitudinal de vibración, se obtiene un valor de frecuencia propia de 7232 Hz, con un factor de amortiguamiento del 0,874 %, siendo esta una frecuencia dominante muy clara sobre el resto de frecuencias obtenidas y sin dar lugar a interpretaciones. Finalmente en la figura 8.17, que se corresponde con el modo torsional, se observa como la frecuencia dominante señalada por el espectro de Fourier se encuentra en el valor 4736 Hz, con un coeficiente de amortiguamiento de 0,813 %. Se observa en los tres casos como siempre el ancho de banda representativo está en torno a los 13 kHz, sin que por encima de ese valor las frecuencias armónicas tengan valores de amplitud altos.

Los resultados obtenidos en este caso son fácilmente interpretables, y entre otros aspectos, indican que la probeta está funcionando como un sólido. En otras ocasiones, como sucede a la probeta 4.2, al analizar el modo torsional (figura 8.18), se observa como aparece una frecuencia dominante en torno a los 6048 Hz, con un grupo de frecuencias armónicas de una amplitud también elevada, si bien de un valor inferior a la dominante. En este caso esas frecuencias marcan una forma de meseta hasta un ancho de banda en torno a los 11 kHz, momento en el cual decae hasta valores poco significativos.

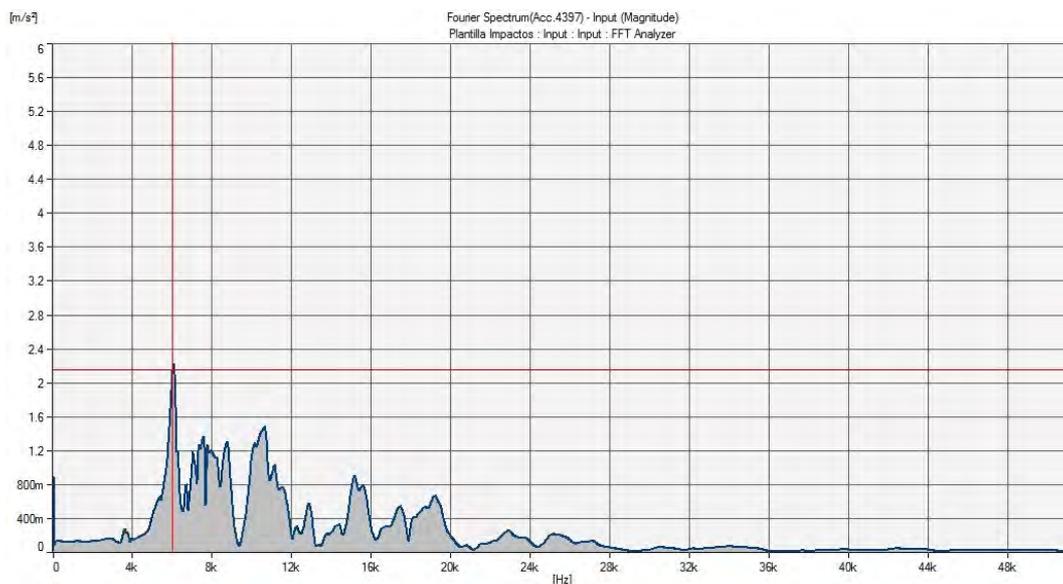


Figura 8.18: Espectro de Fourier de probeta 4.2 en modo torsional

En las seis series de probetas analizadas se han podido localizar estas frecuencias dominantes, si bien, en muchos casos, aparecen acompañados de grupos de armónicos con frecuencias muy cercanas o bien de amplitudes sostenidas en forma de meseta. Con los datos obtenidos se han calculado los valores de módulos de elasticidad y rigidez transversal dinámicos de igual modo a como se hizo con las probetas prismáticas, quedando relacionados en la tabla 8.3. En esa tabla aparecen los datos finales calculados, pudiendo consultarse todos los datos utilizados en el apéndice F. De forma muy general se podría indicar que los valores medios de todas las series serían:

$$E_{din-transv} \simeq 7100MPa; E_{din-long} \simeq 5050MPa; G_{din} \simeq 2800MPa$$

Probeta	Frec. transv. (Hz)	$E_{din-transv}$ (MPa)	Frec. longitud. (Hz)	$E_{din-long}$ (MPa)	Frec. torsional (Hz)	G_{din} (MPa)	$E_{din-UPV}$ (MPa)
1.1	8091	7332	8251	5466	5328	2705	
1.2	8619	8342	8555	5940	5493	2896	
1.3	8848	9614	8704	6652	5691	3369	
1.4	8976	9133	8288	5673	5947	3443	
Media	8633	8605	8449	5933	5615	3103	6044
2.1	7653	6507	7808	4904	5541	2917	
2.2	7749	6749	7733	4797	5493	2868	
2.3	8043	7137	8117	5283	5456	2815	
2.4	8027	7121	8277	5416	4432	1838	
Media	7868	6879	7984	5100	5231	2609	5860
3.1	7312	5591	7323	4089	5067	2309	
3.2	7488	5953	7733	4559	4853	2124	
3.3	7397	5763	7232	3981	4795	2066	
3.4	6965	5262	6912	3694	4485	1844	
Media	7291	5642	7300	4081	4800	2086	4395
4.1	7216	5608	7147	3946	6000	3294	
4.2	7301	6120	7051	4075	6048	3553	
4.3	7877	7266	8085	5445	5520	3010	
4.4	7936	7589	7648	4918	5493	3022	
Media	7583	6646	7483	4596	5765	3220	3902
5.1	7819	6557	7936	4835	5157	2421	
5.2	7979	6849	7925	4933	5120	2430	
5.3	8437	7856	8225	5418	5611	2978	
5.4	8299	7611	8213	5417	5563	2934	
Media	8133	7218	8075	5151	5363	2691	5541
6.1	8352	7835	8464	5772	5701	3102	
6.2	8048	7289	8053	5212	5557	2941	
6.3	8101	7469	8085	5292	5520	2925	
6.4	7813	7607	7648	5085	5493	3125	
Media	8079	7550	8063	5340	5568	3023	6183

Tabla 8.3: Resumen de datos obtenidos mediante FFRF sobre probetas cúbicas

Así, para los módulos de elasticidad dinámicos, la relación entre ambos modos pasa a ser de 1,4, mientras que en las probetas prismáticas era muy cercano a 1. La relación entre el módulo de rigidez transversal y el de elasticidad dinámico transversal se mantiene en el valor 0,4 (igual al de las probetas prismáticas), mientras que sube a 0,55 para la relación con el módulo de elasticidad dinámico longitudinal.

Si se introduce la variable de la dosificación se comprueba que no existen diferencias entre las probetas fabricadas con relaciones 3:1 y 4:1 para los modos transversal y longitudinal, con diferencias en los valores en torno al 1,4 % para el primero y 0,2 % para el segundo. Para el modo torsional se mantiene la diferencia que ya se indicaba en la probetas prismáticas, si bien con un valor menor, en torno al 14,6 % de incremento en la dosificación 4:1 sobre la 3:1.

Si se comparan los valores obtenidos mediante FFRF y UPV en las probetas cúbicas (figura 8.19) se observa como se mantiene la relación de 0,75 entre los módulos elásticos obtenidos mediante UPV y los que se obtienen del modo transversal de vibración. En cambio para el modo longitudinal la relación aumenta hasta el 1,05. Este desfase en los datos viene provocado por la propia diferencia que se aprecia en la relación entre los dos modos, transversal y longitudinal, indicada previamente.

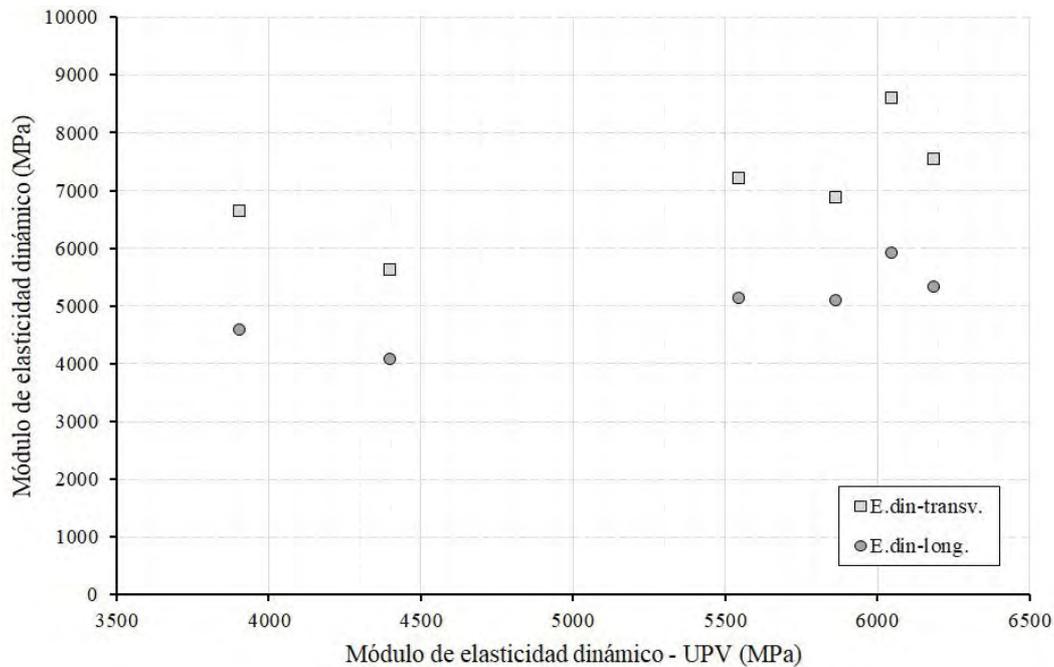


Figura 8.19: Relación entre módulos dinámicos de elasticidad obtenidos mediante FFRF y UPV. Probetas cúbicas

En la figura 8.20 se puede observar cuales son los modos que se podrían considerar como compatibles, a partir de los datos de módulos de elasticidad y rigidez transversal dinámicos obtenidos en los ensayos FFRF sobre las probetas cúbicas y prismáticas. El primero de los modos, transversal, presenta un rango de valores muy parecido, compartiendo incluso el valor medio. Las probetas cúbicas (c) muestran una serie de valores compactos, aún con extremos alejados, mientras que las prismáticas (p) abarcan un rango mayor. La relación de datos en este modo de vibración entre las probetas cúbicas y prismáticas es muy parecida.

Todo lo contrario ocurre para el modo de vibración longitudinal, donde los valores del módulo de elasticidad dinámico difieren notablemente entre las probetas cúbicas (c) y las prismáticas (p). La disminución de los valores obtenidos estaría en torno a un 30 %, presentando las probetas cúbicas los menores resultados. Por su parte al analizar los datos en el modo torsional se vuelve a encontrar cierta semejanza, si bien el rango de valores de las probetas prismáticas es considerablemente más amplio. Hay que recordar la diferencia que se producía entre las dosificaciones en esas probetas, motivo de amplio rango que aparece en la figura. Aún así los valores de las probetas cúbicas serían compatibles con los obtenidos de las probetas prismáticas, siendo sus valores medios muy cercanos.

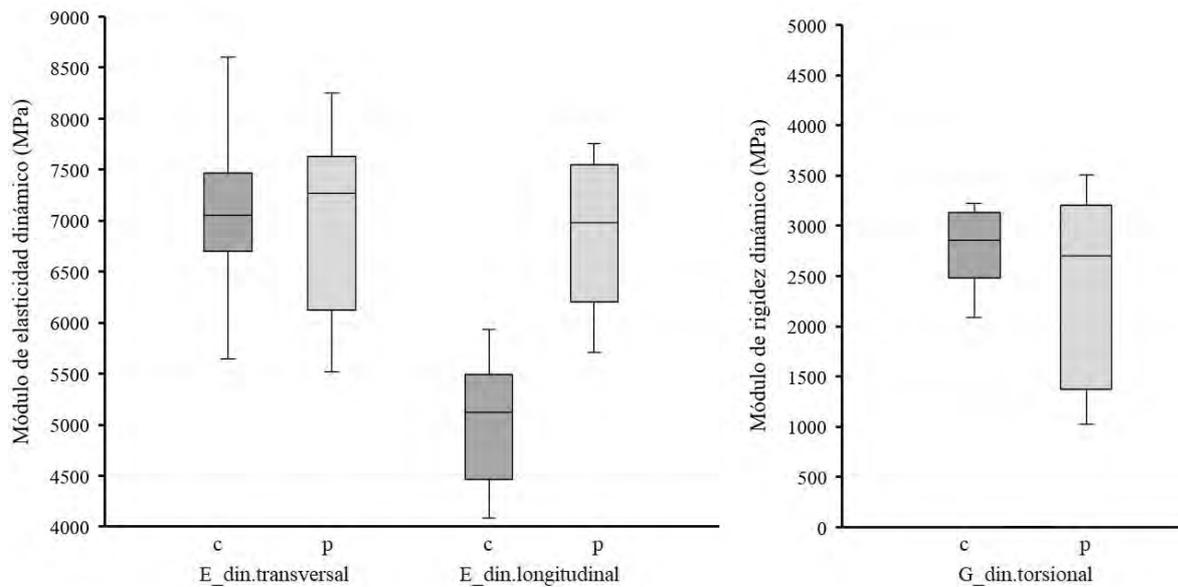


Figura 8.20: Valores de módulos de elasticidad y de rigidez transversal dinámicos en probetas cúbicas (c) y prismáticas (p) de tapial

En la tabla 8.4 aparecen los valores estáticos calculados a partir de la expresión (8.6), una vez obtenidos los valores dinámicos y del factor de amortiguamiento. Los valores de dicho factor de amortiguamiento son sensiblemente superiores a los que obtuvieron en las probetas prismáticas, con valores en este caso cercanos siempre al 1%. No se han registrado valores altos, como ocurría con la probeta P-5 analizada en el capítulo anterior, por lo que se entiende que las probetas cúbicas ensayadas no deben presentar problemas internos propios.

Serie	$E_{din-transv}$ MPa	Amortig. η	$E_{s-transv}$ MPa	$E_{din-long}$ MPa	Amortig. η	E_{s-long} MPa	G_{din} MPa	Amortig. η	G_s MPa	ν_{trans}
1	8605	0,008	7354	5933	0,009	5004	3103	0,009	2628	0,39
2	6879	0,009	5813	5100	0,010	4284	2609	0,012	2188	0,32
3	5642	0,008	4811	4081	0,013	3140	2086	0,011	1739	0,35
4	6646	0,014	5419	4596	0,010	3881	3220	0,010	2690	0,03
5	7218	0,009	6091	5151	0,011	4311	2691	0,010	2262	0,34
6	7550	0,008	6407	5340	0,008	4546	3023	0,009	2558	0,25

Tabla 8.4: Valores de módulos estáticos a partir de dinámicos en probetas cúbicas

Por otro lado la relación entre los módulos estáticos y los dinámicos de las probetas cúbicas se encuentra entre 0,82 y 0,85, valores análogos a los obtenidos en las probetas prismáticas. Finalmente sorprende encontrar que el coeficiente de Poisson de las probetas de dosificación 3:1 (series 1 a 3) vuelve a ser más alto que en de las probetas de dosificación 4:1 (series 4 a 6). Las primeras tendrían un valor $\nu_{3:1} \simeq 0,35$, similar a algunas de las probetas prismáticas 3:1. Por su parte las probetas cúbicas de dosificación 4:1 tendrían un valor medio de 0,21, siendo este un valor que puede ser muy cercano al real, si bien, nuevamente, difiere de manera sustancial del obtenido en la otra dosificación y presenta una alta dispersión. Hay que recordar que el valor de ν para las probetas prismáticas 4:1 estaba entre de 0,19 y 0,21.

Como se ha comentado al principio de este capítulo, investigadores como Higuchi y Kesler (1954) o Jones (1962), entre otros, indicaban que las probetas con relaciones bajas entre su

longitud y su sección no son capaces de vibrar de forma que se puedan obtener valores correctos de los módulos de elasticidad mediante esta técnica. De hecho la norma [UNE-EN:12680-1 \(2007\)](#) marca como límite inferior de relación el valor de 3, mientras que en [ASTM-C:215-19 \(2019\)](#) se cita expresamente el factor de relación longitud/sección igual o superior a 2 al referirse al ensayo en el modo longitudinal.

Las probetas cúbicas de tapial empleadas en este trabajo de tesis responden al comportamiento anómalo indicado por los autores citados, pero únicamente en el modo longitudinal, encajando de forma suficientemente satisfactoria en los otros dos modos de vibración. También se ha constatado que los valores de coeficiente de Poisson obtenidos son muy parecidos, llegando incluso a ponerse de manifiesto las diferencias entre las distintas dosificaciones. Se volverá sobre este punto más adelante, al describir los ensayos realizados sobre la primera serie de sub-probetas obtenidas tras los ensayos destructivos de fractura.

8.5. Obtención de datos mediante FFRF sobre sub-probetas prismáticas sP (205.100.100 mm)

Tras los ensayos de fractura sobre las probetas prismáticas, desarrollado en el capítulo 6, los dos segmentos resultantes del ensayo (de unas dimensiones aproximadas de 220.100.100 mm) se tallan mediante una máquina de corte en dos sub-probetas de 205.100.100 mm, obteniendo 15 unidades que a priori presentan un estado correcto. En resto de piezas quedaron afectadas durante el ensayo de fractura en un modo que hizo imposible su reutilización posterior. Estas sub-probetas (denominadas sP) se vuelven a someter a ensayos FFRF, para conocer si las tensiones aplicadas durante el ensayo de fractura han producido daños en el interior de las mismas. De igual forma se pretende determinar cómo responden las probetas con una relación 2 entre longitud y sección al ensayo mediante FFRF, siendo este ya un valor inferior al indicado por [Higuchi y Kesler \(1954\)](#) y [Jones \(1962\)](#) así como por las dos normas [UNE-EN:12680-1 \(2007\)](#) y [ASTM-C:215-19 \(2019\)](#). Todos los datos recogidos durante los ensayos aparecen en las tablas del apéndice F, mientras que las imágenes de los autoespectros se pueden consultar en el apéndice G

Al igual que se hizo sobre las probetas prismáticas originales, sobre cada sub-probeta se han realizado también tres medidas en cada uno de los tres modos de vibración, indicando finalmente el valor medio de ellas. También es este caso, cada una de las mediciones es a su vez el valor medio de entre ocho y doce golpes sobre la probeta.

Se exponen a continuación los resultados obtenidos sobre la sub-probeta sP-6.1 (dosificación 3:1) y sub-probeta sP-12.1 (dosificación 4:1) (figuras 8.21 a 8.26), como ejemplos de lo que sucede al resto de sub-probetas. Se analizará posteriormente el caso de las dos sub-probetas resultantes de la probeta 7, ya que ésta ha venido presentando de forma continuada los menores valores en todos los ensayos, incluido el módulo de elasticidad obtenido a partir de la curva de ablandamiento, según aparece en la tabla 6.4.

A continuación aparecen los resultados de la sub-probeta 6.1, siendo de nuevo el modo transversal el primero en analizarse (figura 8.21). En este primer modo se puede observar un valor de resonancia claro en la frecuencia de 3152 Hz, con un factor de amortiguamiento de 1,69 %. Posteriormente se excita el modo longitudinal, (figura 8.22) del cual se obtiene un valor muy claro de resonancia en los 5200 Hz, con un amortiguamiento de 1,16 %. Finalmente, el modo torsional, (figura 8.23) marca un valor de resonancia en la frecuencia de 3120 Hz con un amortiguamiento de 1,03 %.

Los autoespectros de esta sub-probeta sP-6.1 son similares a los que mostraba la probeta original, con valores de resonancia muy marcados, pero se diferencian en la presencia de una serie de bajas frecuencias excitadas de manera previa al valor de resonancia. La presencia de estas bajas frecuencias será más llamativa en los autoespectros de las sub-probetas 7.1 y 7.2, como se verá más adelante.

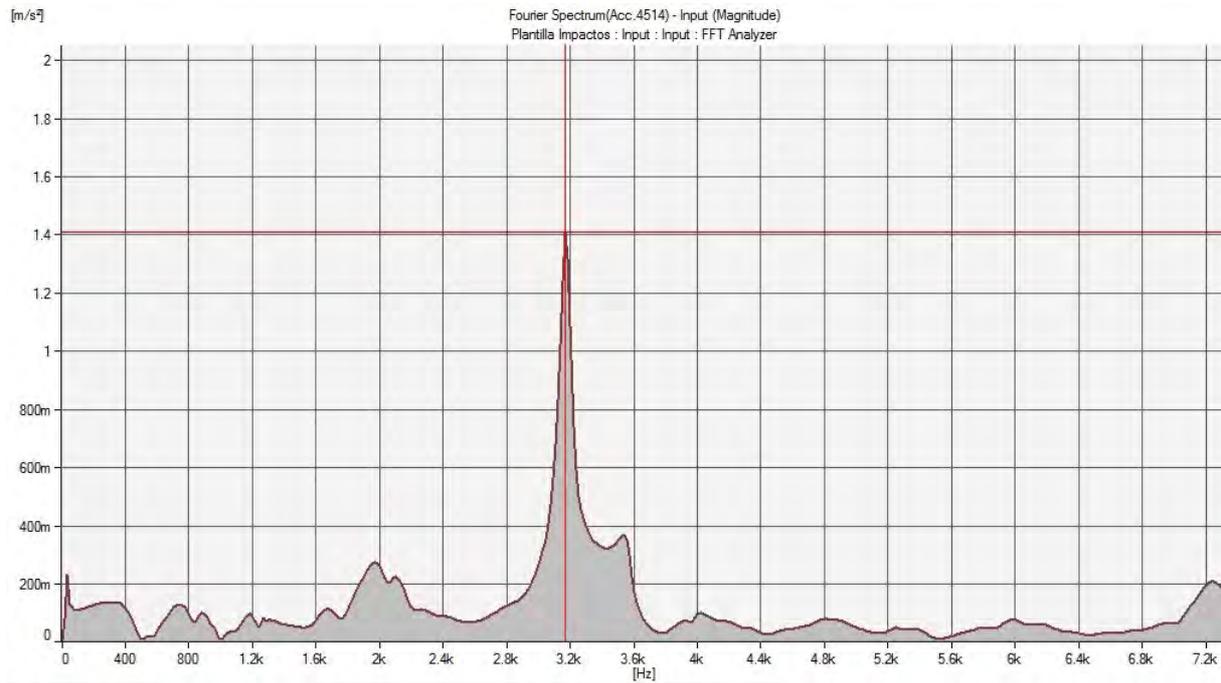
Respecto a los resultados obtenidos sobre la sub-probeta sP-12.1 se puede observar como todas las frecuencias de resonancia presentan valores muy claros, fácilmente identificables en el ancho de banda medido. Así, en el primero de los modos analizados, modo transversal (figura 8.24) la frecuencia de resonancia aparece como un pico muy destacado en 3456 Hz, con un factor de amortiguamiento de 0,533 %. A partir de este valor de frecuencia aparecen otros valores de mayor frecuencia, pero poco representativos, por lo que no se plantean dudas en cuanto al valor aportado.

Por otro lado al excitar el modo longitudinal de vibración (figura 8.25) se obtiene un valor de frecuencia propia de 5120 Hz con un factor de amortiguamiento de 0,57 % para esa medida. Al igual que en el caso anterior la determinación no ofrece dudas ya que el espectro es muy claro, sin que existan frecuencias que compitan en el ancho de banda analizado. Únicamente aparece una frecuencia de menor valor en torno a los 3500 Hz, si bien su valor de aceleración es muy inferior. Si se utiliza este valor de frecuencia para calcular el módulo de elasticidad se obtiene un valor del 50 % inferior a los valores del resto de probetas, siendo además inferior al módulo de rigidez transversal. Por todos estos motivos el valor se descarta, manteniendo el criterio de entender como frecuencia propia aquella que tenga un mayor valor de aceleración.

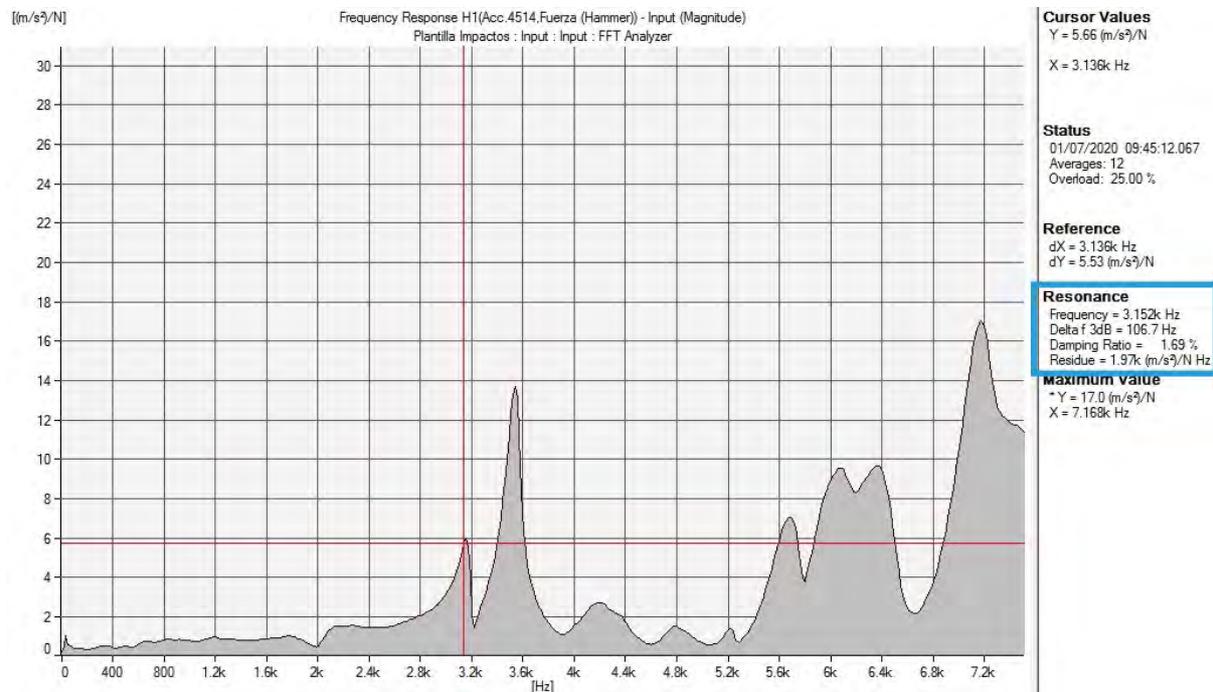
Este valor de frecuencia previo al de resonancia, en torno a los 3000-3500 Hz, aparece también sutilmente señalado en los modos longitudinales de las sub-probetas sP-3.1, sP-6.2, sP-7.2 y sP-10.1, si bien, al igual que en el caso de la sP-12.1, sus valores son muy bajos en comparación con el que presentan las frecuencias identificadas como frecuencias de resonancia.

Finalmente, en el modo torsional (figura 8.26) la frecuencia de resonancia aparece en los 3472 Hz, con un factor de amortiguamiento de 0,486 %. En este caso aparece una frecuencia también menor y muy cercana a la seleccionada con el criterio indicado. Esta cercanía entre ambas frecuencias hace que el valor del módulo de rigidez transversal no cambie de forma significativa al usar cualquiera de los dos, si bien se sigue manteniendo el criterio de seleccionar la que presente mayor valor de aceleración.

Antes de mostrar los resultados de los ensayos FFRF sobre el resto de sub-probetas analizadas se estudiarán en detalle los datos aportados por las sub-probetas sP-7.1 y sP-7.2, re-

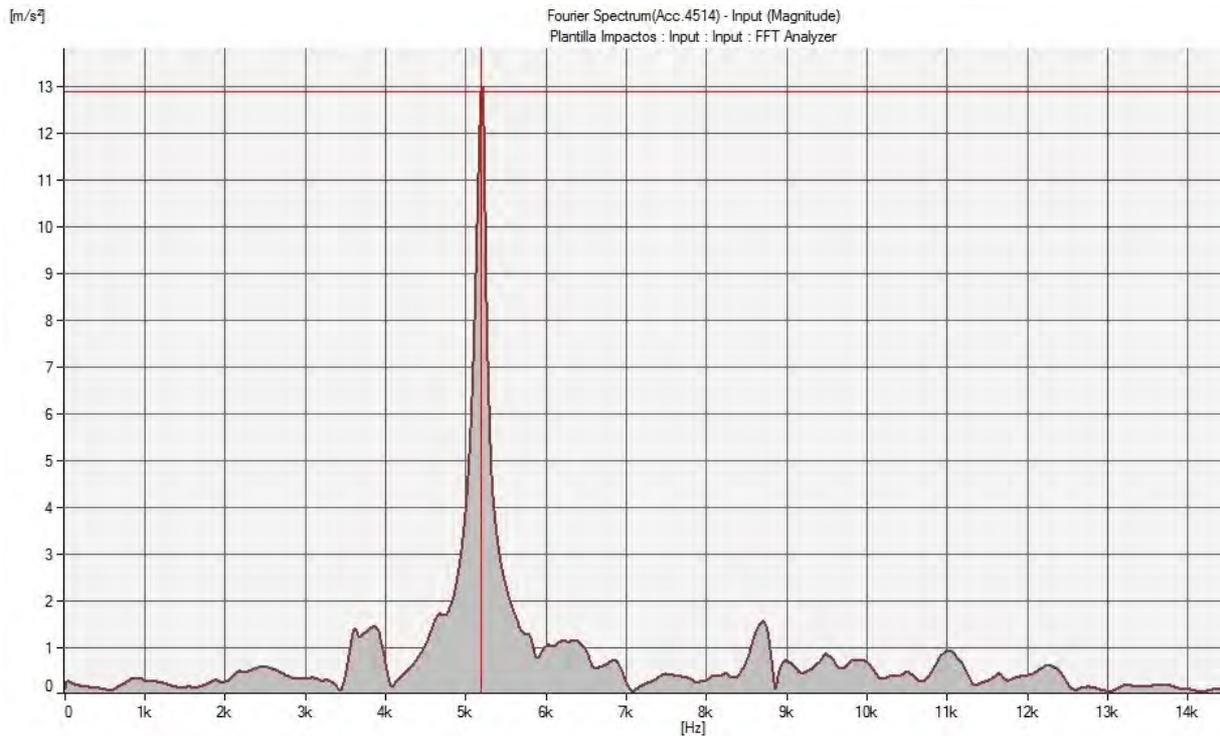


(a) Autospectro sub-probeta 6.1

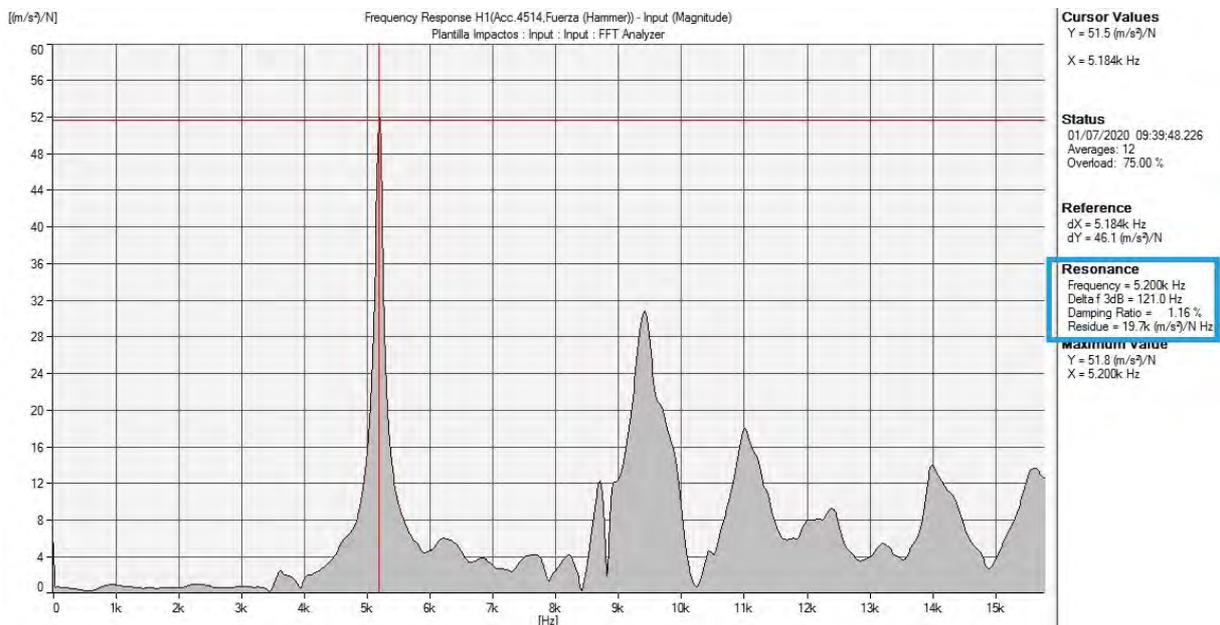


(b) Frecuencia de resonancia sub-probeta 6.1

Figura 8.21: Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo transversal de sub-probeta sP-6.1

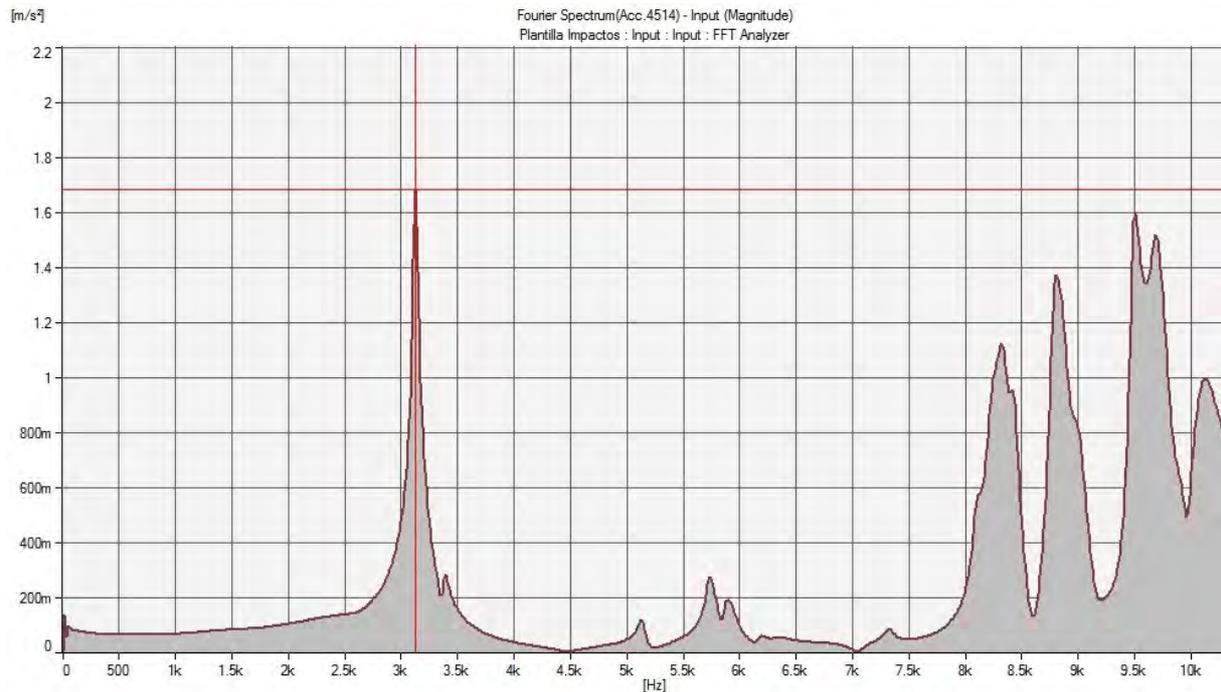


(a) Autoespectro sub-probeta 6.1

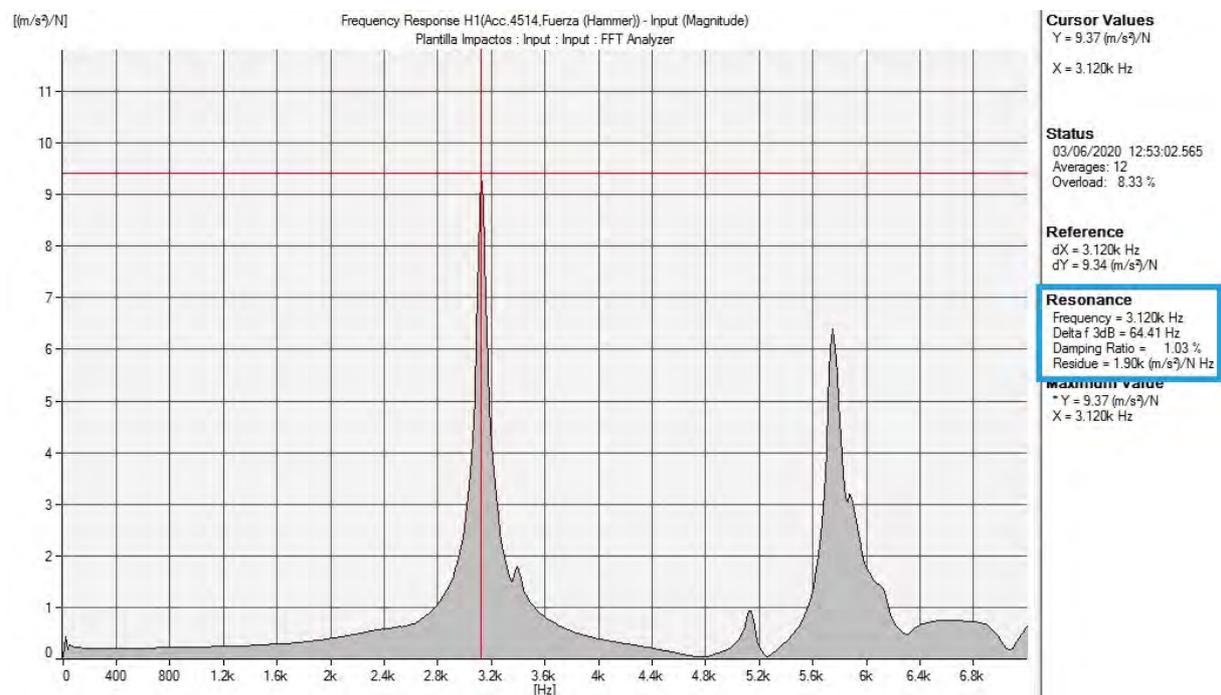


(b) Frecuencia de resonancia sub-probeta 6.1

Figura 8.22: Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo longitudinal de sub-probeta sP-6.1



(a) Autoespectro sub-probeta 6.1



(b) Frecuencia de resonancia sub-probeta 6.1

Figura 8.23: Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo torsional de sub-probeta sP-6.1

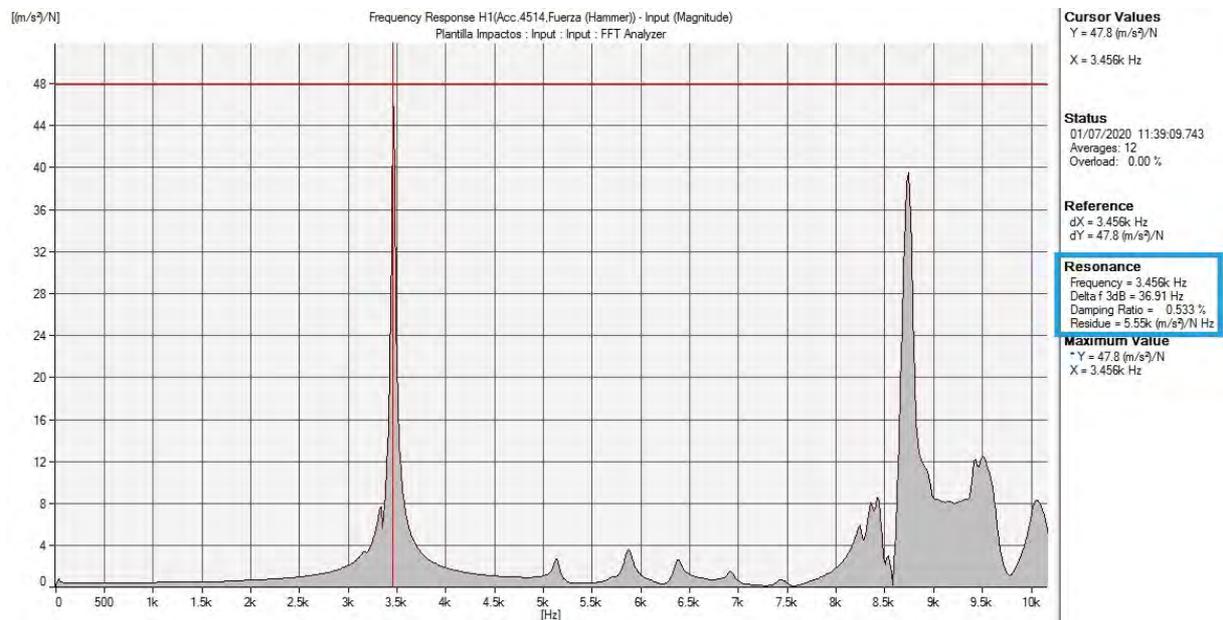
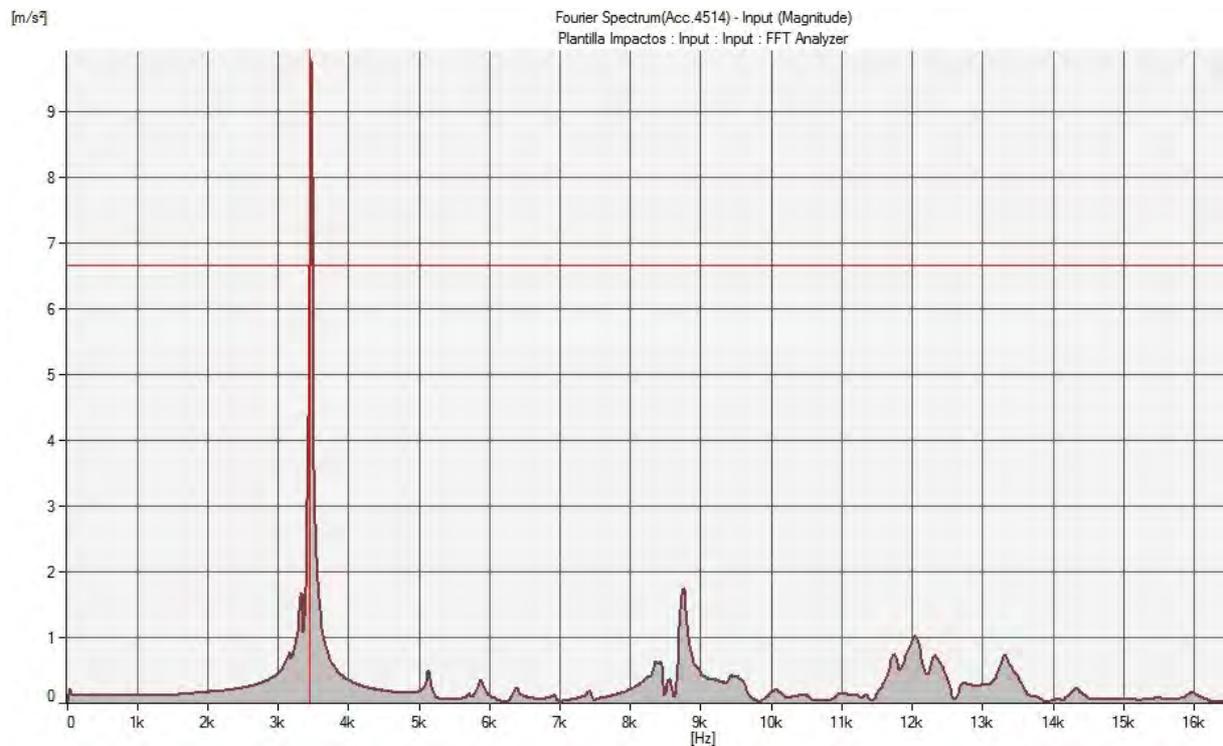
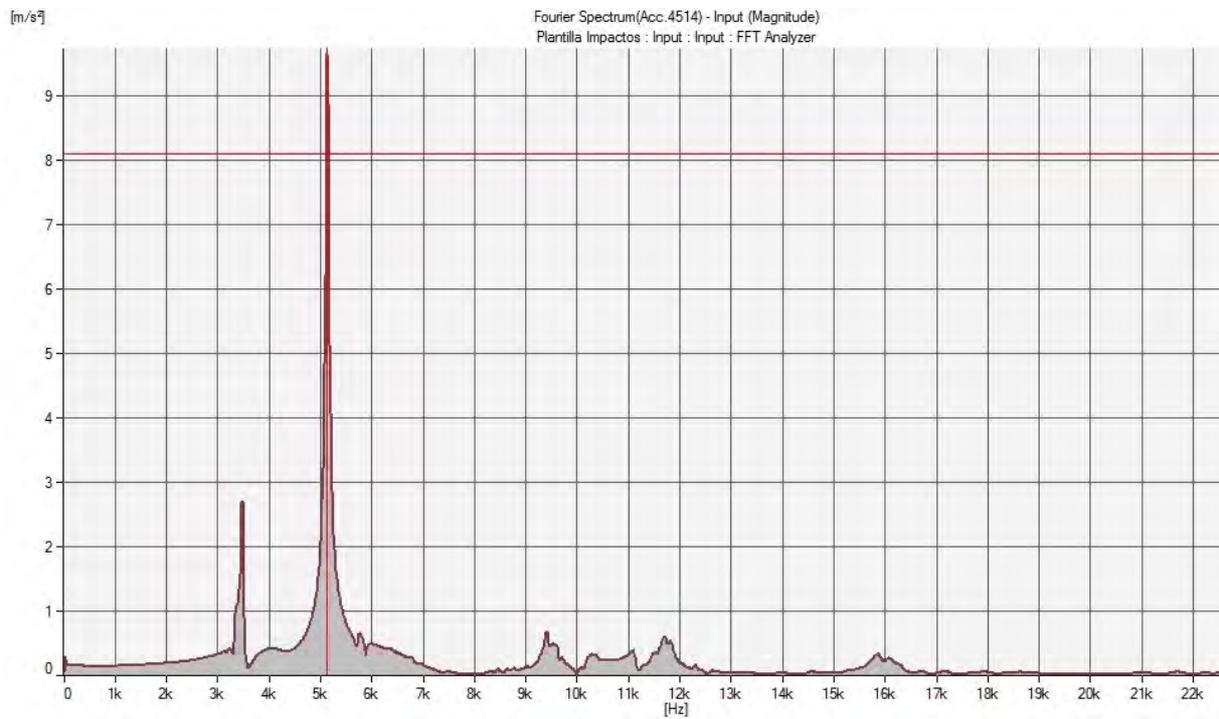
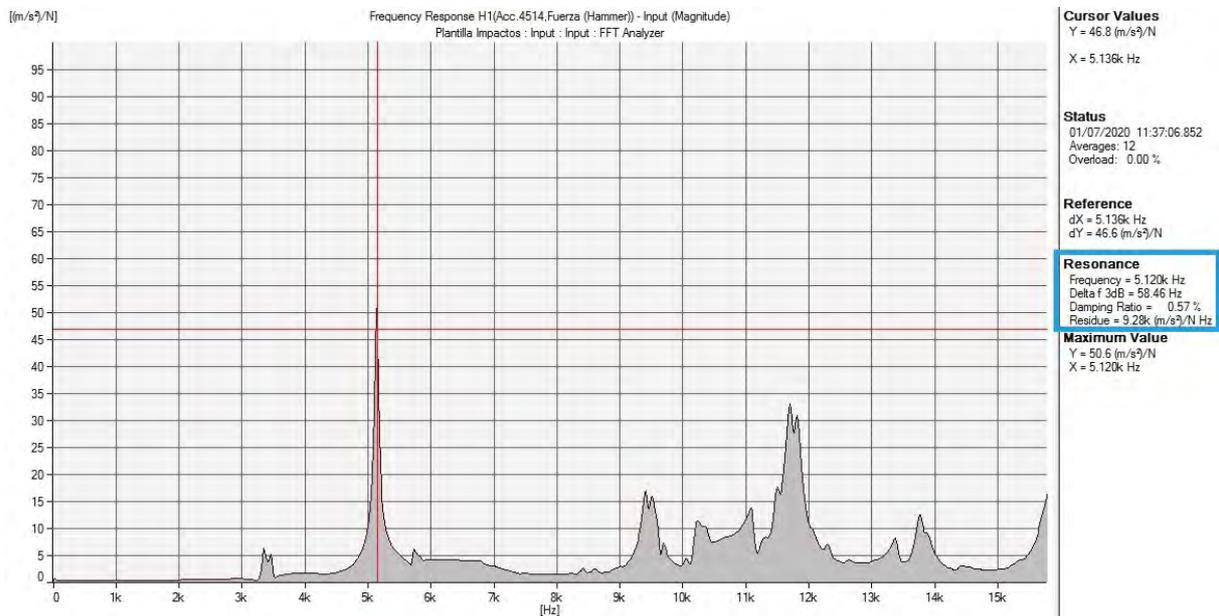


Figura 8.24: Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo transversal de sub-probeta sP-12.1

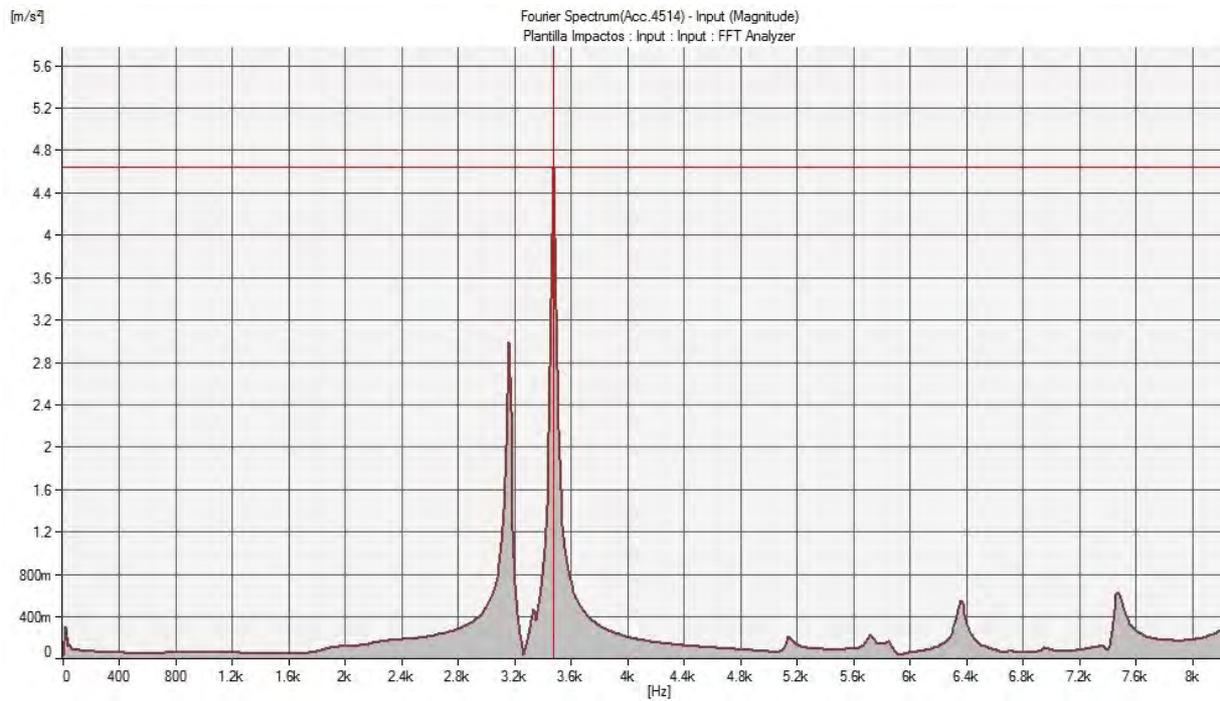


(a) Autoespectro sub-probeta 12.1

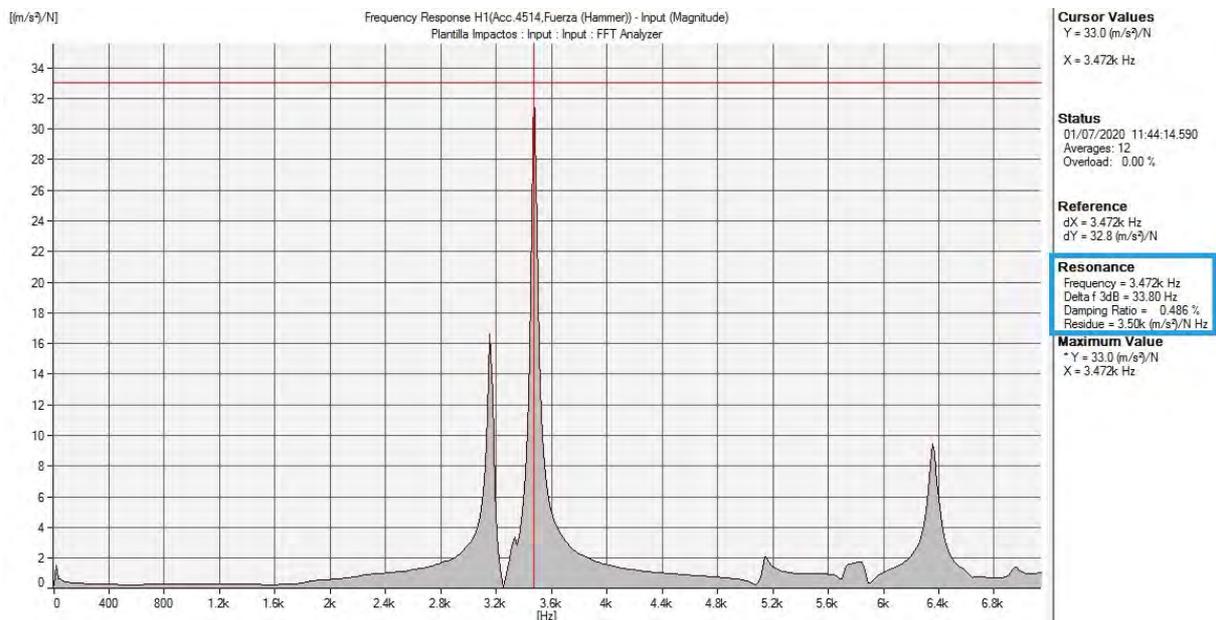


(b) Frecuencia de resonancia sub-probeta 12.1

Figura 8.25: Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo longitudinal de sub-probeta sP-12.1



(a) Autospectro sub-probeta 12.1



(b) Frecuencia de resonancia sub-probeta 12.1

Figura 8.26: Valor de frecuencia de resonancia y factor de amortiguamiento en modo torsional de sub-probeta sP-12.1

presentados en las figuras 8.27 y 8.28 respectivamente. En sus espectros se pueden identificar claramente los valores de frecuencia de resonancia, sin que existan valores que hagan dudar en la interpretación de los resultados.

Algo parecido a lo que ocurría para el modo torsional de la sub-probeta sP-12.1 ocurre en este caso para el modo transversal de la sub-probeta sP-7.2 (figura 8.28a), donde dos frecuencias muy cercanas y con valores de aceleración parecidos podrían ser utilizadas. En este caso ocurre nuevamente que el valor de módulo de elasticidad que se obtendría no se modifica de forma importante, con una variación inferior al 10%. De todos modos, se mantiene el criterio de elección de la frecuencia de mayor aceleración.

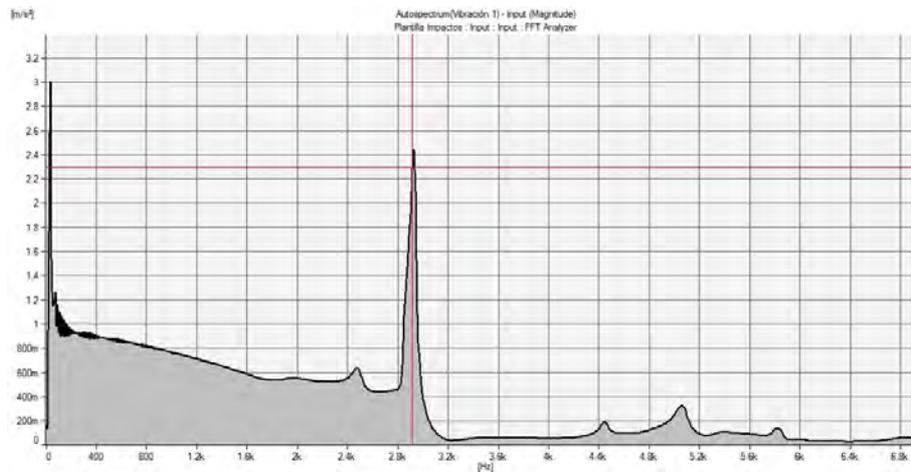
La circunstancia que más destaca en los espectros de las dos sub-probetas sP-7.1 y sP-7.2 respecto del resto de las analizadas son todos los paquetes de bajas frecuencias que son obtenidas de forma previa al valor tomado como frecuencia de resonancia. Toda esa gran cantidad de bajas frecuencias puede estar indicando que el material de la probeta presenta algún tipo de ablandamiento, bien por presentar un problema durante su ejecución o curado, o bien por algún tipo de deterioro tras haber sido sometidas a los ensayos de fractura.

Si se comparan los autoespectros cada modo de vibración de ambas sub-probetas se observan similitudes sobre todo en los dos primeros modos. Así, en el transversal, se aprecia un comportamiento casi idéntico en el ancho de banda de frecuencias anteriores a la frecuencia natural, situación que se repite para el modo longitudinal, donde aparece un pico resonante en los 2950 Hz en ambas sub-probetas, previo a la frecuencia propia que aparecen en los 4500 Hz. En el modo torsional no es tan clara esta concordancia, destacando el valor asintótico de las bajas frecuencias en sP-7.2 (figura 8.28c). Este efecto de ablandamiento o degradación de la sub-probeta se puede observar también en la sP-3.1, sP-9.1 y en el modo transversal de sP-9.2.

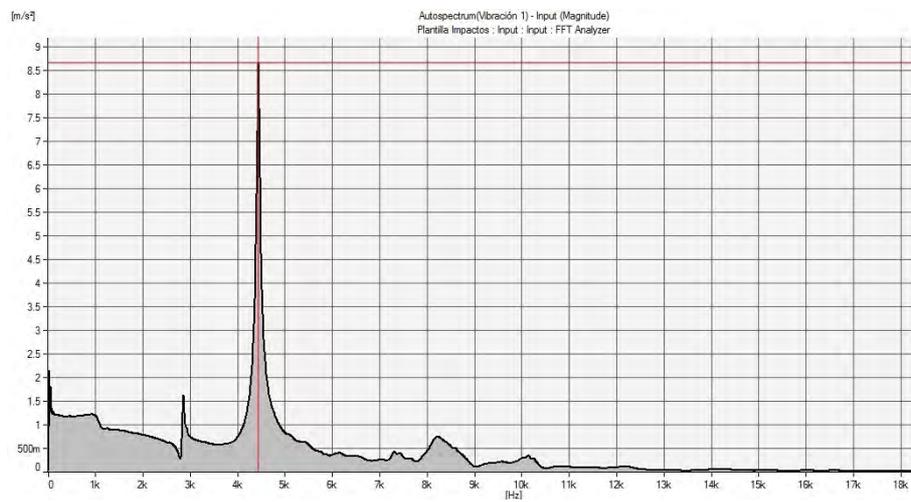
Al analizar de forma conjunta todos los espectros obtenidos y hacer una comparación con los que se obtuvieron sobre las probetas prismáticas anteriores, se puede observar como en muchos casos el comportamiento de las sub-probetas es muy parecido y parece responder a un resultado correcto. En otras ocasiones aparecen valores que claramente indican que las sub-probetas han resultado dañadas, aunque exteriormente no manifiesten ningún tipo de deterioro visible.

Una vez obtenidos todos los datos de las sub-probetas y mediante las expresiones que se indican en el capítulo 8, se calculan nuevamente los valores de módulo de elasticidad y rigidez transversal dinámicos que aparecen en la tabla 8.5, donde también aparecen los módulos estáticos. En la tabla se indican además los valores medios diferenciados por dosificaciones, sin que en este caso se aprecien distinciones por este motivo en cuanto a los datos obtenidos.

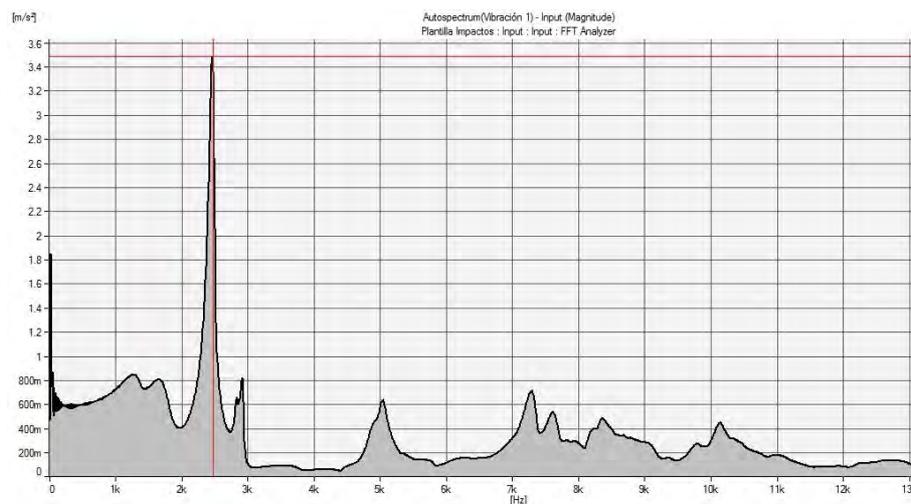
Los valores de factor de amortiguamiento han aumentado ligeramente, pasando de un rango entre el 0,5 y 1% para las probetas prismáticas iniciales a un rango entre el 0,8 y el 1,5% para las sub-probetas analizadas. Este aumento en el amortiguamiento puede deberse a diversos factores, si bien se puede descartar el daño sobre las probetas como causa principal del aumento. De hecho, las probetas señaladas como dañadas a partir de los datos de frecuencias (sP-7.1 y sP-7.2) presentan valores de amortiguamiento dentro de los valores medios, lo que, en principio, descarta este motivo.



(a) Modo transversal sub-probeta 7.1

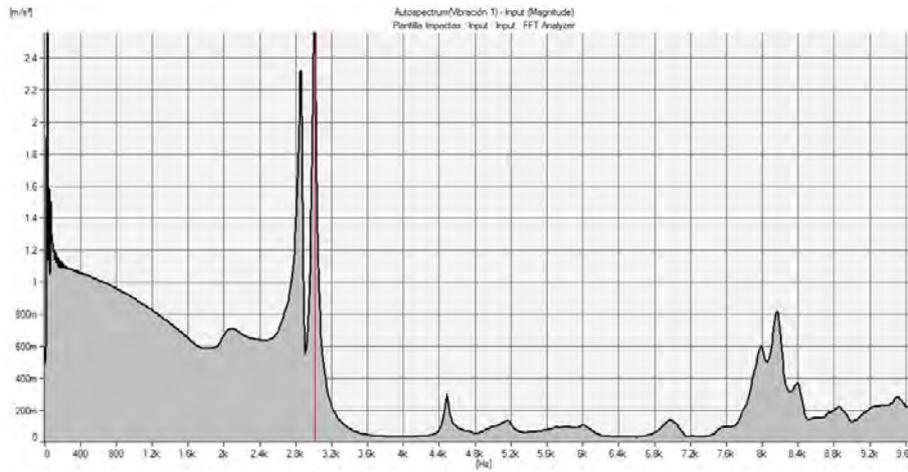


(b) Modo longitudinal sub-probeta 7.1

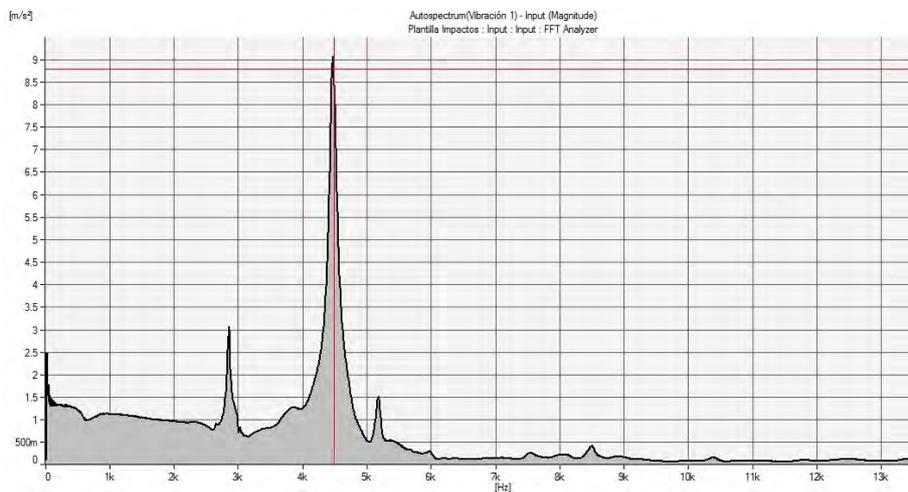


(c) Modo torsional sub-probeta 7.1

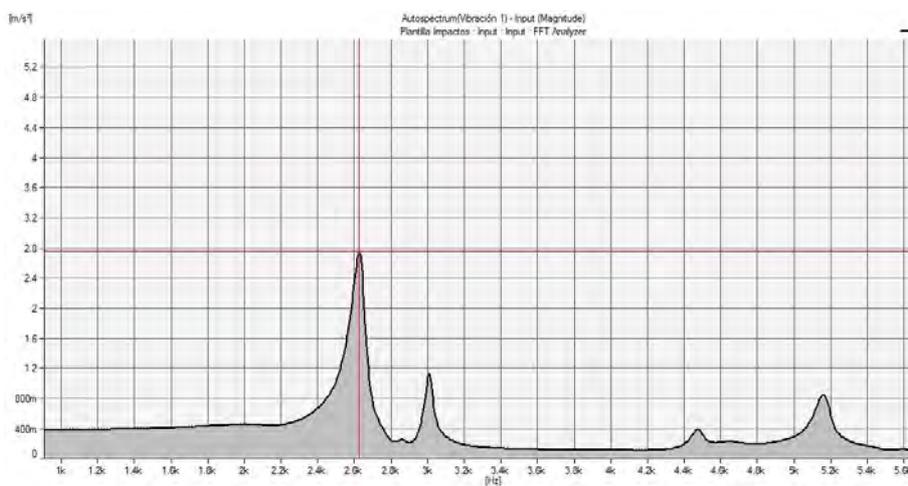
Figura 8.27: Valores de frecuencia de resonancia de sub-probeta sP-7.1



(a) Modo transversal sub-probeta 7.2



(b) Modo longitudinal sub-probeta 7.2



(c) Modo torsional sub-probeta 7.2

Figura 8.28: Valores de frecuencia de resonancia de sub-probeta sP-7.2

Uno de los motivos puede ser el tamaño de las probetas, con una relación longitud-sección por debajo de lo indicado como valor mínimo para asegurar un correcto funcionamiento del método FFRF (Higuchi y Kesler, 1954) (Jones, 1962). Otro de los motivos puede ser la carbonatación de las probetas, que puede llevar a modificar su capacidad durante un periodo de tiempo muy largo. Como se expondrá en el capítulo 9 este extremo ya fue controlado antes de someter a las probetas a los ensayos de fractura, si bien el avance de la carbonatación o la nueva longitud de las sub-probetas pueden haber dado como resultado un aumento en el amortiguamiento.

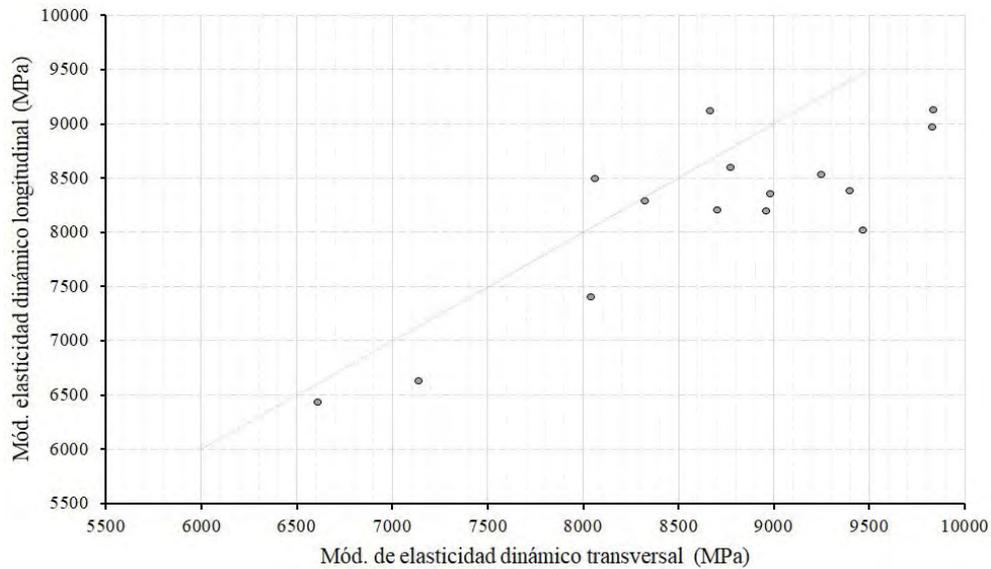
Probeta	$E_{din-transv}$ (MPa)	Amortig. η	$E_{s-transv}$ (MPa)	$E_{din-long}$ (MPa)	Amortig. η	E_{s-long} (MPa)	G_{din} (MPa)	Amortig. η	G_s (MPa)
sP-1.1	8704	0,008	7414	8196	0,006	7085	3310	0,011	2770
sP-1.2	9468	0,008	8055	8010	0,012	6653	2505	0,043	1892
sP-3.1	8041	0,030	5237	7399	0,013	6123	3843	0,019	3097
sP-6.1	8669	0,016	7056	9115	0,013	7529	3888	0,011	3252
sP-6.2	8981	0,009	7634	8349	0,005	7252	4490	0,008	3819
\bar{X} dosif. 3:1	8773		7079	8214		6928	3607		2966
sP-7.1	6612	0,009	5600	6431	0,008	5473	2369	0,016	1935
sP-7.2	7139	0,006	6154	6621	0,012	5485	2691	0,015	2199
sP-9.1	8776	0,007	7527	8590	0,007	7377	3790	0,009	3193
sP-9.2	8324	0,007	7244	8283	0,007	7099	3693	0,007	3156
sP-10.1	8064	0,007	6910	8484	0,005	7375	3558	0,014	2924
sP-10.2	9246	0,007	7924	8529	0,006	7331	3714	0,006	3201
sP-11.1	8961	0,016	7310	8194	0,011	6823	4380	0,011	3661
sP-11.2	9399	0,012	7673	8378	0,006	7231	3843	0,012	3184
sP-12.1	9829	0,005	8521	8968	0,006	7756	4879	0,005	4237
sP-12.2	9835	0,006	8595	9125	0,005	7967	3969	0,007	3397
\bar{X} dosif. 4:1	8618		7346	8160		6992	3689		3109

Tabla 8.5: Resumen de datos obtenidos mediante FFRF sobre sub-probetas prismáticas sP

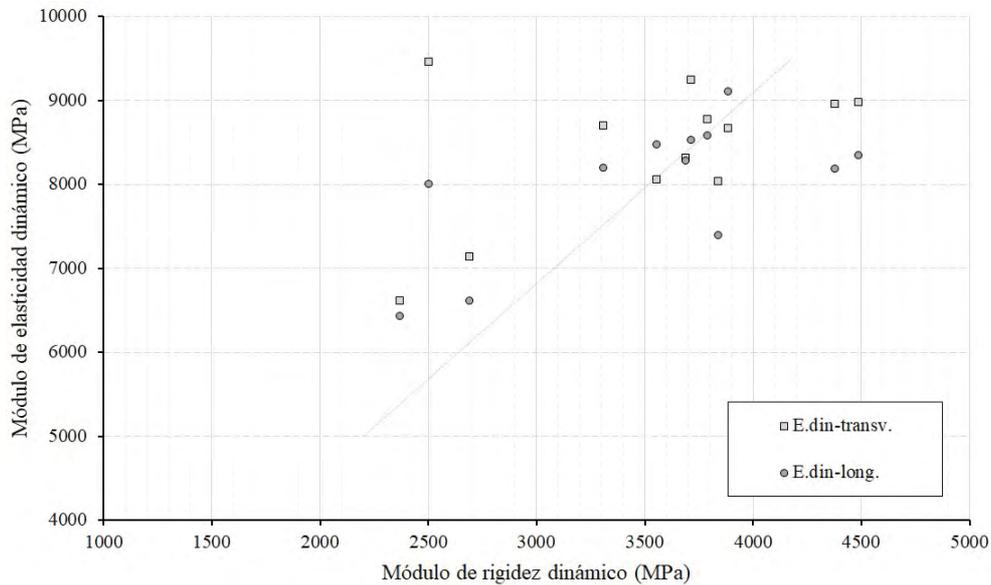
De forma análoga a como se hizo con las probetas prismáticas se establecen relaciones entre los módulos de elasticidad en función del modo de vibración y de éstos con el valor del módulo de rigidez transversal. Así, como se puede ver en la figura 8.29a, la relación entre los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos de los modos transversal y longitudinal mantienen el valor de 1, mientras que la relación de éstos con el módulo de rigidez transversal (fig. 8.29b) se puede establecer en torno a 0,44 sin que exista diferencia en función de las dosificaciones.

Si se comparan estas relaciones con las obtenidas sobre las probetas prismáticas originales se comprueba como la relación entre los módulos de elasticidad no se modifica, cosa que no ocurre con el módulo de rigidez transversal. La relación que existía entre E_{din} y G_{din} en las probetas prismáticas originales estaba fuertemente relacionado con la dosificación, siendo de 0,24 para la dosificación 3:1 y 0,40 para la dosificación 4:1. Esta diferencia ha desaparecido en estas sub-probetas, aumentado ligeramente hasta 0,44, pudiendo encontrar en la carbonatación una explicación a este fenómeno de ajuste.

En la tabla 8.6 se recogen los valores de módulos de elasticidad y de rigidez transversal de las probetas prismáticas y se comparan con los valores medios (\bar{X}) de las sub-probetas prismáticas sP. Se comprueba que en todos los casos existe un aumento, salvo en la comparación de los valores de módulo de rigidez transversal para las probetas P-1 y P-7. Analizando los incrementos que se producen en los módulos de elasticidad se comprueba que de forma general



(a) Relación entre módulos dinámicos de elasticidad transversal y longitudinal en sub-probetas



(b) Relación entre módulos dinámicos de elasticidad y de rigidez transversal dinámico en sub-probetas

Figura 8.29: Relaciones entre módulos de elasticidad dinámicos y módulo de rigidez transversal dinámico en sub-probetas sP de tapial

varían entre el 5 y 20 %, mientras que los módulos de rigidez transversal presentan incrementos aún mayores.

Los módulos de elasticidad calculados mediante los ensayos realizados con anterioridad mostraban cierta coherencia, tal y como quedaba reflejado en la figura 6.14, en la que se podría observar como los valores obtenidos mediante FFRF eran ya superiores a los valores obtenidos por los otros dos métodos (UPV y fractura). Se puede buscar el origen de esta causa en la carbonatación, que explicaría el aumento en las probetas de dosificación 3:1, en base a una carbonatación más lenta en las probetas de con mayor cantidad de estabilizante, si bien su participación sería menos clara en el aumento de los valores de E y G en las probetas de dosificación 4:1.

Probetas	$E_{din-transv}$ (MPa)	$E_{s-transv}$ (MPa)	$E_{din-long}$ (MPa)	E_{s-long} (MPa)	G_{din} (MPa)	G_s (MPa)	ν_{trans}	ν_{long}
P-1	8094	6849	7546	6579	2751	2333		
\bar{X} sP-1	9086	7734	8103	6869	2907	2331	0,56	0,39
$\Delta P \rightarrow sP$	12,26 %	12,92 %	7,39 %	4,41 %	5,70 %	-0,09 %		
P-3	7047	5922	6924	6010	1377	1162		
\bar{X} sP-3	8041	5237	7399	6123	3843	3097	-	-
$\Delta P \rightarrow sP$	14,10 %	-11,57 %	6,87 %	1,88 %	179,03 %	166,49 %		
P-6	7559	6404	6980	5884	1454	1222		
\bar{X} sP-6	8825	7345	8732	7390	4189	3536	-	-
$\Delta P \rightarrow sP$	16,75 %	14,69 %	25,09 %	25,60 %	188,17 %	189,33 %		
P-7	6162	5219	6203	5404	2697	2291		
\bar{X} sP-7	6876	5877	6526	5479	2530	2067	0,36	0,29
$\Delta P \rightarrow sP$	11,57 %	12,61 %	5,20 %	1,39 %	-6,18 %	-9,77 %		
P-9	7625	6587	7751	6696	3431	2863		
\bar{X} sP-9	8550	7385	8437	7238	3741	3174	0,14	0,13
$\Delta P \rightarrow sP$	12,12 %	12,12 %	8,84 %	8,09 %	9,05 %	10,87 %		
P-10	7583	6402	7174	6259	3207	2747		
\bar{X} sP-10	8655	7417	8506	7353	3636	3063	0,19	0,17
$\Delta P \rightarrow sP$	14,14 %	15,85 %	18,57 %	17,49 %	13,40 %	11,49 %		
P-11	7268	6130	7140	6233	2321	1950		
\bar{X} sP-11	9180	7492	8286	7027	4111	3423	0,12	-
$\Delta P \rightarrow sP$	26,31 %	22,21 %	16,05 %	12,72 %	77,18 %	75,54 %		
P-12	8251	7026	7737	6761	3508	3006		
\bar{X} sP-12	9832	8558	9046	7862	4424	3817	0,11	-
$\Delta P \rightarrow sP$	19,16 %	21,80 %	16,92 %	16,29 %	26,10 %	26,98 %		

Tabla 8.6: Comparación de valores de módulos de elasticidad y de rigidez transversal, dinámicos y estáticos, entre probetas prismáticas y sub-probetas prismáticas sP

Si se analizan los valores de módulos de elasticidad de la probeta P-7 y sus sub-probetas se comprueba que presentan el menor incremento de todas, 12,61 % en $E_{s-transv}$ y 1,39 % en E_{s-long} . Esta cercanía en los datos no significa que el comportamiento de la sub-probeta y de su probeta inicial sean comparables, ya que precisamente las sub-probetas 7.1 y 7.2 han sido detectadas como dañadas. De esa manera se puede indicar que en este caso la aproximación en los datos no puede ser tenida en cuenta.

En este caso la relación entre los módulos estáticos y los dinámicos de las sub-probetas prismáticas se encuentra entre 0,80 y 0,85, siendo estos unos valores muy parecidos a los obtenidos en las probetas prismáticas. Finalmente el coeficiente de Poisson de las sub-probetas de dosificación 3:1 se mantienen en valores altos de $\nu_{3:1} \simeq 0,48$ de media entre los dos modos, mientras que para las sub-probetas de dosificación 4:1 se mantiene con un valor muy cercano al calculado anteriormente de $\nu_{4:1}$ entre 0,18 y 0,20 de media de cada uno de los modos, recordando que el valor de ν para las probetas prismáticas 4:1 oscilaba entre 0,19 y 0,21.

Por lo tanto, se puede indicar que las sub-probetas sP presentan unos valores que alejan aún más los módulos de elasticidad y rigidez transversal de los valores calculados hasta el momento por otros métodos, pudiendo tener como origen de este comportamiento el propio tamaño de las piezas y en parte la carbonatación. Contrasta este dato con el observado al someter las series de probetas cúbicas a los ensayos de FFRF, donde se conseguían valores cercanos a las prismáticas, salvo para el modo longitudinal (figura 8.20) donde era claramente inferior.

Los efectos de ajuste que se han podido medir en las sub-probetas sP con dosificación 3:1, tanto en la relación entre módulos de elasticidad y rigidez transversal, como en el valor del coeficiente de Poisson se pueden deber a un proceso de carbonatación más lento sobre las probetas con una mayor cantidad de estabilizante. Este aspecto se tratará en el capítulo 9.



Figura 8.30: Vista de la preparación de la sub-probeta 11.2 en modo longitudinal

8.6. Obtención de datos mediante FFRF sobre sub-probetas cúbicas ssP (100.100.100 mm)

Una vez que han sido obtenidos los datos mediante el ensayo FFRF sobre las sub-probetas sP de 205.100.100 mm éstas vuelven a ser cortadas, obteniendo así las sub-probetas cúbicas 100.100.100 mm (denominadas ssP), y que por tanto provienen de las probetas prismáticas

originales. Al igual que el en caso anterior algunas piezas se deterioran durante su manipulación, por lo que finalmente se obtienen solamente 27 piezas cúbicas. De estas probetas cúbicas se recaban nuevamente datos mediante ensayos FFRF. Todos los datos obtenidos pueden ser consultados en el apéndice F.

Como ejemplo del deterioro de algunas de las piezas se muestra una imagen de la sub-probeta cúbica ssP-9.1.2 (figura 8.31) la cual se dividió de forma espontánea por una de las zonas de contacto entre tongadas después de ser cortada.



Figura 8.31: Sub-probeta cúbica ssP-9.1.2 tras su rotura no controlada

Como ya se indicó en el capítulo anterior, los tres espectros de la sub-probeta sP-9.1 presentaban un ancho de banda de bajas frecuencias excitadas, representados como una meseta asintótica previa al valor de frecuencia propia, tal y como se representa en la figura 8.32. La rotura de esta sub-probeta cúbica por uno de los planos de tongada constructiva puede estar relacionado con dicha meseta de bajas frecuencias, ya que la sub-probeta sP-3.1 presentaba el mismo efecto en sus espectros y sufrió el mismo problema de laminación. Ambas roturas se pueden deber a un ablandamiento del material en la ZPF vista en el capítulo dedicado a la fractura, ya que en el caso de la sub-probeta sP-9.1, la sub-probeta cúbica ssP-9.1.1 presentó un comportamiento relativamente correcto. La diferencia entre ssP-9.1.1 y ssP-9.1.2 (rota) es que esta última era la zona central de la probeta prismática 9, mientras que ssP-9.1.1 era uno de los bordes.

Los ensayos FFRF sobre las sub-probetas cúbicas ssP han mostrado un comportamiento muy desigual y de difícil interpretación. En muchos casos los datos de frecuencias obtenidos deben ser elegidos entre un rango de posibles opciones, si bien se ha mantenido siempre el criterio de seleccionar la primera de las frecuencias que presente un mayor valor de aceleración de los valores. En la figura 8.33 se muestran algunos de los espectros de las sub-probetas cúbicas analizadas, donde se pueden ver como los valores de resonancia aún destacan sobre el resto de frecuencias, si bien su lectura es menos clara.

No se puede olvidar que las series de probetas que se están analizando en este momento han sufrido un ensayo de fractura y dos cortes con máquina de agua, por lo que su materialidad puede estar mermada. En otros casos las frecuencias muestran unos valores de aceleración

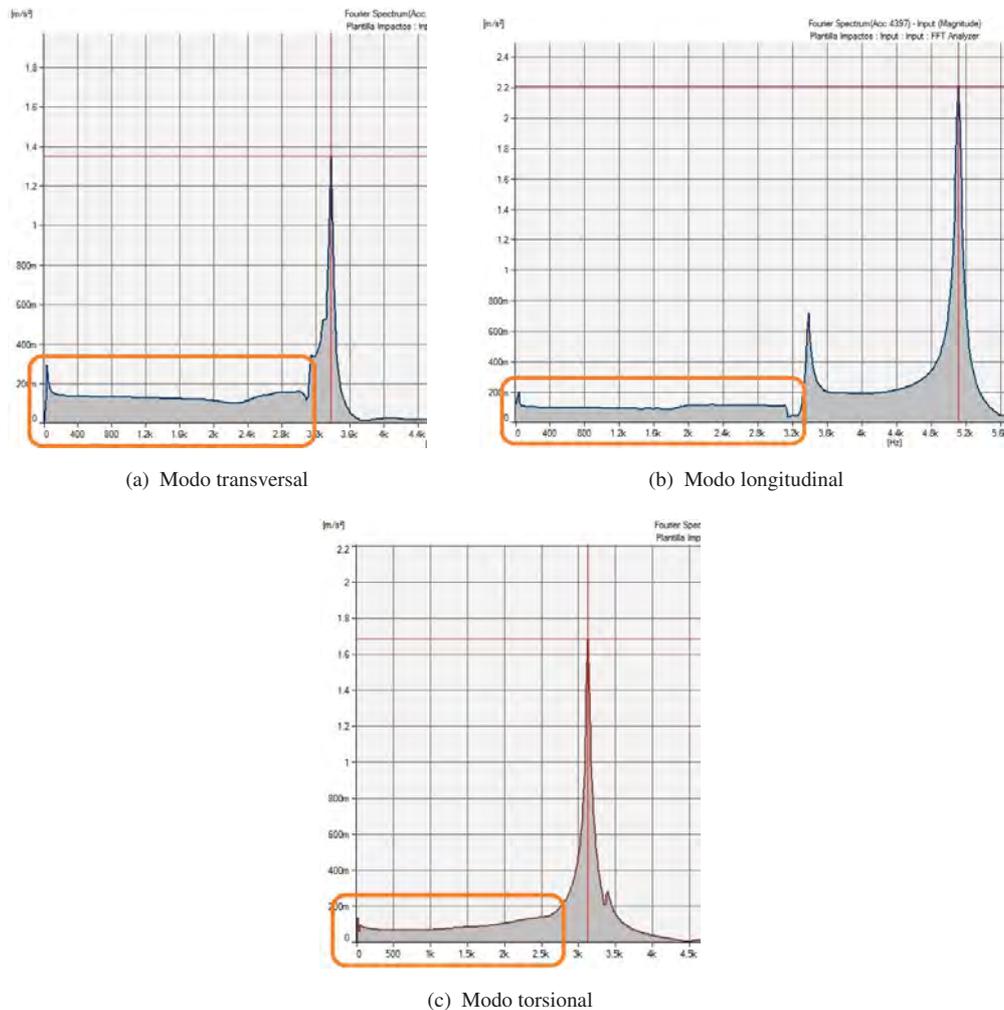


Figura 8.32: Detalle de los espectros de frecuencias de la sub-probeta sP-9.1

muy bajos, si bien este efecto se debe relacionar más con un defecto en el ensayo, que se puede vincular a su vez con la poca esbeltez lateral que presentan las probetas, con una relación longitud-sección de 1.

Aún así la mayoría de los valores obtenidos son relativamente estables, apareciendo las mayores diferencias en el modo torsional. En la tabla 8.7 se muestran los valores de módulos de elasticidad y de rigidez transversal dinámicos, así como el factor de amortiguamiento y los correspondiente módulos estáticos. En la misma tabla aparecen los valores medios de cada una de las dosificaciones, sin que tampoco en este caso aparezcan diferencias reseñables.

Se vuelven a establecer relaciones entre los datos obtenidos, en función de los distintos modos de vibración y entre los valores estáticos y dinámicos. En este caso la relación que existe entre los módulos de elasticidad dinámicos según el modo excitado es de 1,5, lo que supone un notable incremento y desajuste de los valores obtenidos hasta el momento, que era en $E_{din-trans}/E_{din-long} \simeq 1,0$. La relación entre el módulo de rigidez transversal dinámico y los modos de elasticidad transversal y longitudinal también se incrementa pasando a ser 0,45 en el primero de los casos y 0,60 en el segundo, frente a los 0,44 que presentaban las sub-probetas

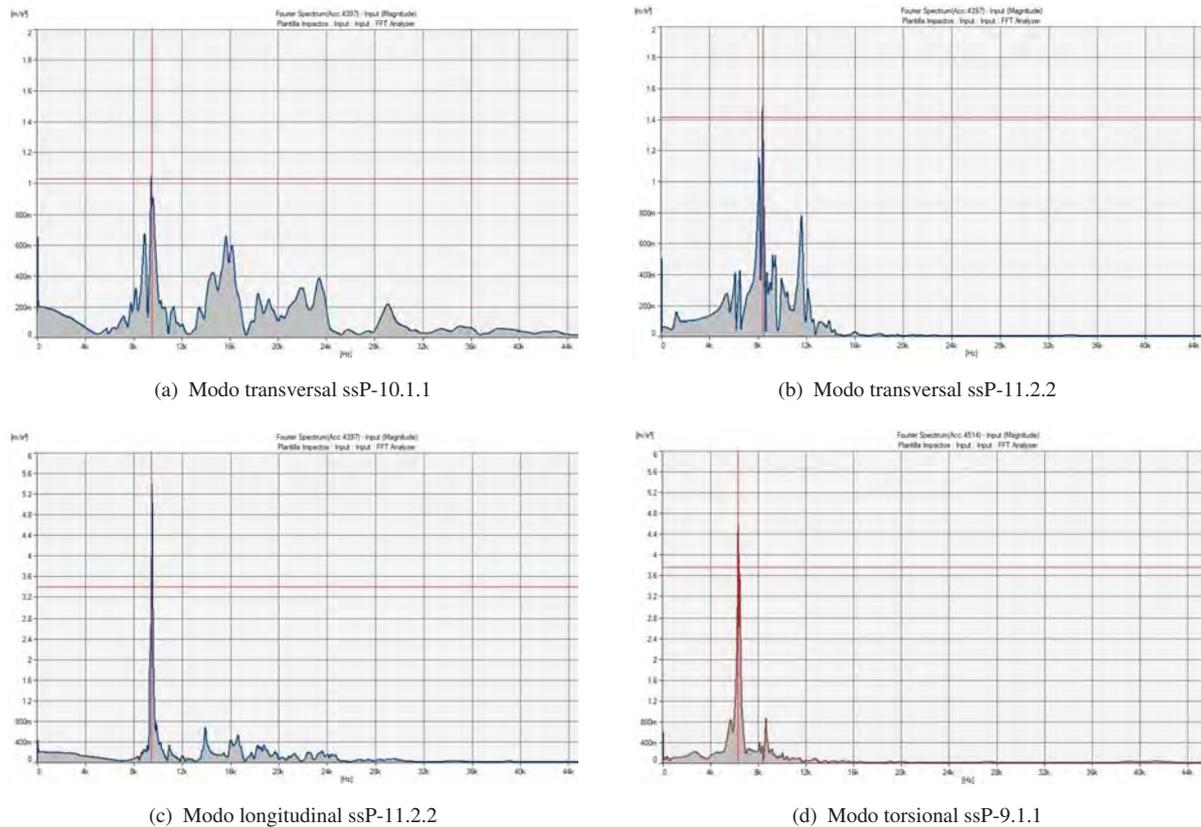


Figura 8.33: Espectros de frecuencia más representativos de sub-probetas cúbicas ssP

analizadas en el capítulo anterior. Al igual que en los casos anteriores no se aprecia diferencia en función de la dosificación. Lo que se mantiene prácticamente sin diferencia es la relación que existe entre los módulos estáticos y dinámicos, con valores entre 0,82 y 0,84 en función de los modos, siendo esta una relación que permanece constante desde las probetas prismáticas originales.

Finalmente los valores del coeficiente de Poisson de las sub-probetas cúbicas de dosificación 3:1 presentan un el valor medio de $\nu_{3:1} \simeq 0,22$, mientras que para las sub-probetas cúbicas de dosificación 4:1 aumenta respecto al calculado anteriormente a $\nu_{4:1} \simeq 0,26$, toda vez que las probetas prismáticas originales presentaban un valores $\nu_{4:1}$ entre 0,19 y 0,21. Aún así, es de resaltar la dispersión de los datos obtenidos.

En la tabla 8.8 se resumen todos los datos de los módulos de elasticidad obtenidos mediante FFRF sobre las probetas prismáticas y las sub-probetas obtenidas (sP y ssP). En el capítulo anterior ya se ha puesto de manifiesto la falta de concordancia de los datos obtenidos sobre las sub-probetas prismáticas sP en relación a las prismáticas originales, con incrementos en los módulos de elasticidad entre un 5 y un 20 %. Si se incorporan los datos de las sub-probetas cúbicas ssP se observa como el comportamiento varía en función del modo de vibración analizado.

Así, en el modo transversal se mantiene el incremento al comparar los módulos de las sub-probetas cúbicas ssP respecto a las prismáticas originales ($\Delta P \rightarrow ssP$), con valores entre el

Probeta	$E_{din-transv}$ (MPa)	Amortig. η	$E_{s-transv}$ (MPa)	$E_{din-long}$ (MPa)	Amortig. η	E_{s-long} (MPa)	G_{din} (MPa)	Amortig. η	G_s (MPa)
ssP-1.1.1	9474	0,009	7977	6646	0,007	5703	3318	0,009	2798
ssP-1.1.2	10319	0,010	8640	6930	0,012	5742	3142	0,011	2620
ssP-1.2.1	8739	0,008	7477	6086	0,015	4993	3076	0,008	2611
ssP-1.2.2	9061	0,008	7716	5498	0,006	4758	3362	0,008	2854
ssP-6.1.1	1127	0,044	850	6674	0,056	4925	998	0,073	718
ssP-6.1.2	9834	0,014	8076	5050	0,020	4048	4220	0,009	3572
ssP-6.2.1	10073	0,008	8607	4917	0,022	3925	4598	0,008	3901
ssP-6.2.2	9680	0,014	7978	5261	0,041	3993	4116	0,008	3491
\bar{X} dosif. 3:1	8538		7165	5883		4761	3354		2821
ssP-7.1.1	5593	0,010	4699	4090	0,021	3274	2309	0,012	1919
ssP-7.1.2	6151	0,007	5279	4554	0,008	3867	2124	0,013	1755
ssP-7.2.1	5773	0,008	4901	3982	0,010	3334	2066	0,011	1725
ssP-7.2.2	5152	0,008	4401	3606	0,008	3065	1794	0,008	1526
ssP-9.1.1	9938	0,008	8430	6953	0,016	5671	3652	0,040	2776
ssP-9.2.1	7400	0,010	6197	5209	0,008	4437	3747	0,009	3174
ssP-9.2.2	7179	0,018	5506	5080	0,007	4357	3668	0,020	2944
ssP-10.1.1	10398	0,015	8510	7315	0,006	6294	3546	0,034	2735
ssP-10.1.2	8443	0,006	7305	7667	0,005	6642	3924	0,006	3386
ssP-10.2.1	8933	0,012	7420	7211	0,006	6214	3549	0,014	2920
ssP-10.2.2	10438	0,006	9140	7362	0,008	6255	3722	0,020	2988
ssP-11.1.1	10428	0,017	8455	7344	0,015	6005	596	0,044	450
ssP-11.1.2	12735	0,017	10323	6872	0,018	5567	637	0,060	467
ssP-11.2.1	10073	0,008	8547	4917	0,022	3925	4598	0,008	3901
ssP-11.2.2	9680	0,014	7800	5261	0,041	3993	4116	0,008	3491
ssP-12.1.1	5613	0,006	4853	3948	0,008	3365	3296	0,007	2815
ssP-12.1.2	6107	0,009	5152	4075	0,009	3448	3559	0,011	2968
ssP-12.2.1	7267	0,010	6105	5446	0,006	4690	3010	0,008	2554
ssP-12.2.2	7589	0,012	6254	4918	0,009	4157	3022	0,008	2563
\bar{X} dosif. 4:1	8152		6804	5569		4661	2997		2477

Tabla 8.7: Resumen de datos obtenidos mediante FFRF sobre sub-probetas cúbicas ssP

1,58 y el 47,62 %, apareciendo un valor en negativo de -8,04 % en \bar{X} ssP-7, si bien estas sub-probetas ya habían sido puestas bajo sospecha en función de los espectros mostrados. Por otro lado, en el modo torsional la comparación no es posible, siendo probablemente el modo que más se ve afectado por el efecto del tamaño, con valores de incrementos positivos y negativos.

Finalmente, al analizar los incrementos en el modo longitudinal de estas sub-probetas cúbicas se encuentran una serie de valores negativos que encajan muy bien con los valores que se calcularon sobre las series de probetas cúbicas (figura 8.20). Así, se obtienen reducciones en el módulo de elasticidad dinámico entre un -16 y un -40 %, que pasa a ser de un -20 a un -42 % en el caso de módulo de elasticidad estático. Solo aparece un valor en positivo poco significativo de un 1,5 a 3 % en \bar{X} ssP-10.

Probetas	$E_{din-transv}$ (MPa)	$E_{s-transv}$ (MPa)	$E_{din-long}$ (MPa)	E_{s-long} (MPa)	G_{din} (MPa)	G_s (MPa)	ν_{trans}
P-1	8094	6849	7546	6579	2751	2333	0,46
\bar{X} sP-1	9086	7734	8103	6869	2907	2331	
\bar{X} ssP-1	9398	7952	6290	5299	3225	2721	
$\Delta P \rightarrow sP$	12,26 %	12,92 %	7,39 %	4,41 %	5,70 %	-0,09 %	
$\Delta P \rightarrow ssP$	16,12 %	16,10 %	-16,64 %	-19,46 %	17,23 %	16,63 %	
P-6	7559	6404	6980	5884	1454	1222	0,10
\bar{X} sP-6	8825	7345	8732	7390	4189	3536	
\bar{X} ssP-6	7678	6378	5476	4223	3483	2920	
$\Delta P \rightarrow sP$	16,75 %	14,69 %	25,09 %	25,60 %	188,17 %	189,33 %	
$\Delta P \rightarrow ssP$	1,58 %	-0,41 %	-21,56 %	-28,23 %	139,61 %	138,99 %	
P-7	6162	5219	6203	5404	2697	2291	0,37
\bar{X} sP-7	6876	5877	6526	5479	2530	2067	
\bar{X} ssP-7	5667	4820	4058	3385	2074	1731	
$\Delta P \rightarrow sP$	11,57 %	12,61 %	5,20 %	1,39 %	-6,18 %	-9,77 %	
$\Delta P \rightarrow ssP$	-8,04 %	-7,65 %	-34,58 %	-37,36 %	-23,11 %	-24,45 %	
P-9	7625	6587	7751	6696	3431	2863	0,11
\bar{X} sP-9	8550	7385	8437	7238	3741	3174	
\bar{X} ssP-9	8172	6711	5747	4822	3689	2965	
$\Delta P \rightarrow sP$	12,12 %	12,12 %	8,84 %	8,09 %	9,05 %	10,87 %	
$\Delta P \rightarrow ssP$	7,17 %	1,88 %	-25,85 %	-27,99 %	7,52 %	3,55 %	
P-10	7583	6402	7174	6259	3207	2747	0,30
\bar{X} sP-10	8655	7417	8506	7353	3636	3063	
\bar{X} ssP-10	9553	8094	7389	6351	3685	3007	
$\Delta P \rightarrow sP$	14,14 %	15,85 %	18,57 %	17,49 %	13,40 %	11,49 %	
$\Delta P \rightarrow ssP$	25,98 %	26,43 %	2,99 %	1,48 %	14,92 %	9,47 %	
P-11	7268	6130	7140	6233	2321	1950	-
\bar{X} sP-11	9180	7492	8286	7027	4111	3423	
\bar{X} ssP-11	10729	8781	6099	4872	2487	2077	
$\Delta P \rightarrow sP$	26,31 %	22,21 %	16,05 %	12,72 %	77,18 %	75,54 %	
$\Delta P \rightarrow ssP$	47,62 %	43,24 %	-14,59 %	-21,84 %	7,17 %	6,54 %	
P-12	8251	7026	7737	6761	3508	3006	-
\bar{X} sP-12	9832	8558	9046	7862	4424	3817	
\bar{X} ssP-12	6644	5591	4597	3915	3222	2725	
$\Delta P \rightarrow sP$	19,16 %	21,80 %	16,92 %	16,29 %	26,10 %	26,98 %	
$\Delta P \rightarrow ssP$	-19,47 %	-20,43 %	-40,59 %	-42,09 %	-8,17 %	-9,35 %	

Tabla 8.8: Comparación de valores de módulos de elasticidad y de rigidez transversal dinámicos y estáticos entre probetas prismáticas, sub-probetas prismáticas sP y sub-probetas cúbicas ssP

En la figura 8.34 se representan los valores de módulo de elasticidad dinámico en modo longitudinal de las probetas cúbicas (c), prismáticas (p) y sub-probetas cúbicas (ssP), tomando

parte de los datos que ya aparecían en la figura 8.20. Se observa como los valores de las sub-probetas cúbicas se relacionan de una manera muy ajustada con las probetas cúbicas, si bien presentan valores extremos muy alejados entre sí.

No se puede olvidar en ningún momento que el tamaño de las probetas (c y ssP) está muy por debajo de la relación de longitud-sección indicada como apropiada, pero es posible que la diferencia de datos obtenidos responda a un defecto en el sistema para este tamaño de probetas. De ser así se podrían realizar correlaciones, que deben ser sancionadas con la práctica sobre un número mayor de probetas.

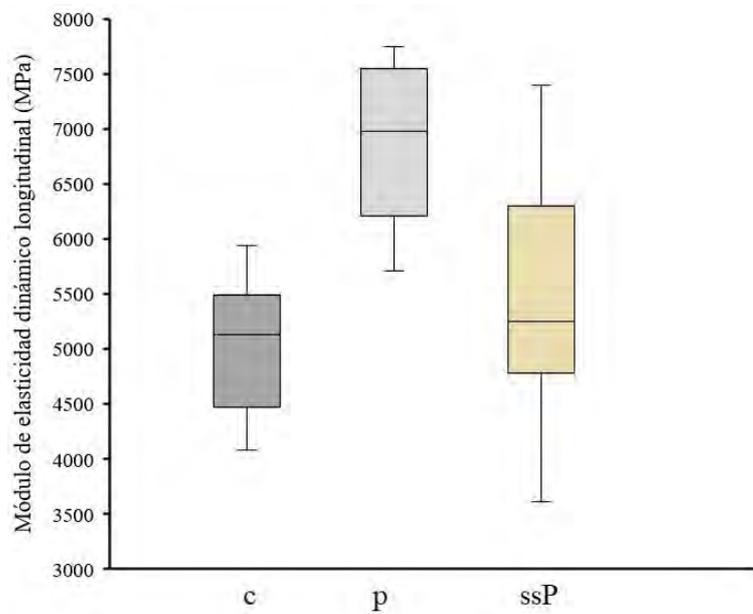


Figura 8.34: Comparación de valores de módulo de elasticidad dinámico, a partir del modo longitudinal de vibración, entre series cúbicas (c), prismáticas (p) y sub-probetas cúbicas (ssP)

Capítulo 9

Efecto de la carbonatación sobre las probetas de tapial

La carbonatación es un lento proceso natural de cambio en los materiales de construcción que emplean la cal como aglomerante, mediante la incorporación de CO₂ atmosférico al material, formándose nuevamente el carbonato cálcico inicial, y cerrando así el *ciclo de la cal* (ver apartado 4.2.2). Este proceso irá provocando en el material cambios micro-estructurales que harán que sus capacidades mecánicas se modifiquen en función del tiempo transcurrido y la exposición atmosférica a la que esté sometido (Groves, 1994), (Lynch, 1998).

El proceso de carbonatación en un tapial ejecutado con cal como estabilizante es una transformación positiva, que mejora sus capacidades, si bien es un proceso lento. En piezas del hormigón armado, donde la armadura metálica está protegida de la corrosión por la alta alcalinidad del medio (pH~12), la carbonatación se convierte en un proceso a evitar. La incorporación del CO₂ ambiental al hormigón provoca un descenso en su alcalinidad, bajando su pH hasta valores de 8 a 9, y perdiendo por tanto el carácter protector sobre las armaduras que pasan a estar expuestas a la corrosión, afectando por tanto a la durabilidad y capacidad de la pieza estructural. Este fenómeno, que se vuelve decisivo en ambientes salinos o agresivos, ha sido profundamente estudiado desde hace mucho tiempo por un gran número de autores, sin que sea objeto de esta tesis entrar en su desarrollo. Tan solo se indicará que en el hormigón la carbonatación dependerá de varios factores, como son la cantidad de cemento, la porosidad del material y la cantidad de adiciones de puzolanas (Fernández Paris, 1973) (Moreno *et al.*, 2004).

El comportamiento de la carbonatación en materiales con base cal ha sido objeto de estudio de varios investigadores, si bien muchos menos que en el hormigón. Entre los trabajos más extensos se pueden citar los de Paige-Green (1984), Korneev y Tsvang (1986), (Moorehead, 1986) o (Rosone *et al.*, 2019), llegando a una serie de conclusiones en cuanto a los factores que afectan a la velocidad de carbonatación, tal y como se describen en el trabajo realizado por Cazalla *et al.* (2002).

El primero de los factores a tener en cuenta en el avance de la carbonatación es el tiempo, ya que puede tardar varios años en completar el proceso en algunos materiales. Como ejemplo se puede indicar que se han encontrado grandes masas de mortero de cal romano en las que el núcleo aún no está carbonatado (Arizzi, 2012). De hecho la propia carbonatación exterior en una probeta provoca que ésta se vuelva más impermeable, creando así un proceso autobloqueante de la difusión del CO₂ ambiental, (Moorehead, 1986), y dilatando por tanto aún más en el tiempo el periodo de carbonatación. Así, la formación de carbonato cálcico a partir de la portlandita en la superficie de la probeta provoca que el CO₂ ambiental tenga más dificultad para introducirse en ella. Este proceso autolimitante provoca que la relación entre la profundidad de carbonatación y el tiempo no sea lineal. Este efecto temporal estará también ligado a la propia forma del elemento estudiado, quedando afectado por la relación entre el volumen de la pieza y su superficie de contacto con el ambiente.

Otros de los factores que influyen en la velocidad de carbonatación son las condiciones ambientales en las que se encuentre la muestra, temperatura y humedad. Así, Fernández Carrasco (1999) indica que la temperatura óptima para la evolución de la carbonatación en cementos aluminosos es de 20°C, mientras que Šauman (1971) y Álvarez Cabrera (1994) indican que el proceso se acelera en ambientes con una humedad entre el 45 y el 75 %, viéndose reducida en ambientes con una humedad relativa superior al 80 %. En esas condiciones de alta humedad las moléculas de agua suturan los poros de las probetas, impidiendo la entrada del gas, ya que ambas tienen un diámetro molecular parecido, 5,8 Å para el CO₂ frente a 6,2 Å para el H₂O (Fernández Paris, 1973). Estos autores indican también que el proceso de carbonatación se frena para humedades inferiores al 25 %, explicando este fenómeno por la excesiva falta de agua, que imposibilita la difusión del dióxido de carbono.

El último de los factores de influencia en la velocidad de carbonatación es la propia estructura porosa del material, ya que la difusión del CO₂ ambiental podrá ser más profunda y rápida en función del tamaño de la red capilar del material (Bonen, 1994), (Cazalla *et al.*, 2000a).

9.1. Desarrollo de la carbonatación en las probetas cúbicas

La medida de la profundidad de carbonatación se obtiene mediante la aplicación de un indicador de pH sobre una cara interior de las probetas de tapial, una vez que éstas han sido partidas tras someterlas al ensayo de carga máxima de compresión. El indicador utilizado es fenolftaleína (C₂₀H₁₄O₄) disuelta al 1 % en alcohol metílico, siendo este el indicador habitual en los estudios que se realizan sobre carbonatación. Este indicador permanece incoloro en zonas donde el material tenga un pH igual o inferior a 8,2 mientras que se torna de un color rosado a rosa intenso conforme el valor del pH se acerca a valores de 9,5 - 10.

Así, en la norma UNE:13295-05 (2005) se define la profundidad de carbonatación (d_k) en el hormigón como *“la distancia media, medida en mm, a partir de la superficie del hormigón o del mortero, en la que el dióxido de carbono (CO₂) ha reducido la alcalinidad del cemento hidratado, hasta tal punto que una disolución indicadora de fenolftaleína permanece incolora.”*



Figura 9.1: Carbonatación en probetas cúbicas de tapial

La profundidad de la carbonatación (d_k) sobre las probetas de tapial se ha medido con un calibre digital con una precisión de $\pm 0,01$ mm, siguiendo las indicaciones que aparecen en la norma [UNE:14630-07 \(2007\)](#). En la figura 9.1 se muestra como ejemplo el interior de dos probetas sobre las que se ha aplicado el indicador de pH. Como se puede observar la carbonatación sobre las probetas avanza de forma paralela en todas las caras, reduciéndose la zona no carbonatada a un núcleo central, que tendrá un determinado tamaño en función de los factores indicados anteriormente.

La forma de conocer la profundidad de carbonatación en una probeta pasa por ser necesariamente empírica, si bien existen algunas expresiones que recogen de manera muy satisfactoria el comportamiento y la posición del frente de carbonatación en función del tiempo. Los estudios llevados a cabo sobre hormigón por [Vénuat y Alexandre \(1969\)](#) ya indicaban que existía un factor de relación (K) entre la profundidad del frente de carbonatación (x) y el tiempo (t), de forma que, una vez transcurrido un periodo inicial posiblemente lineal, la velocidad de carbonatación es inversamente proporcional a la profundidad carbonatada ([Gaspar-Tebar y Plaza, 1977](#)):

$$\frac{dx}{dt} = \frac{K}{x} \quad (9.1)$$

Por tanto el factor K será un valor propio de cada material, a determinar de forma empírica, y en él se recogerán de forma implícita todos los factores de influencia indicados anteriormente. A partir de la relación (9.1) [Verbeck \(1958\)](#) desarrolla la expresión (9.2), siendo ésta la expresión base a partir de la cual se desarrollan las ecuaciones que aparecen en la normativa vigente, y que se utilizan en esta tesis (9.3). Para la obtención de los valores de k se ha medido la profundidad de carbonatación en mm y el tiempo en días, con lo que las unidades del factor de carbonatación son $mm/\sqrt{días}$.

$$x = k \cdot t^{1/2} \quad (9.2)$$

$$d_x = k \cdot \sqrt{t} \quad (9.3)$$

Las probetas han sido almacenadas en condiciones de laboratorio, con una temperatura media de 24°C y una humedad relativa media del 40 %. Estas condiciones medias reproducen las existentes en la ciudad de Granada, simulando así de manera lo más realista posible las condiciones de un tramo real de muro de tapial colocado a la intemperie. Aún así, y para evitar dañar las probetas de otros tipos de afecciones climáticas, se han mantenido alejadas de la acción directa del sol o de la lluvia, ya que las probetas son en todos los casos de un tamaño muy inferior a los muros reales y por tanto más atacables por situaciones externas. Todas ellas se colocaron durante su almacenaje sobre planchas de entramado metálico (tipo *tramex*) o fueron volteadas diariamente, para favorecer el contacto con el aire de todas sus caras.

Los frentes de carbonatación observados presentan un borde de límite claro entre la zona carbonatada y la no carbonatada. No se han observado cavidades de carbonatación ni interferencias causadas por la presencia de áridos, densos ni porosos.

En la tabla 9.1 se relacionan los datos de las probetas de dosificación 3:1, indicando la fecha de fabricación, la fecha de rotura de la probeta en la prensa y el número de días transcurridos entre ambas fechas (periodo de carbonatación). También se indican las profundidades de carbonatación media (d_k) y el factor de carbonatación (k) calculado a partir de la expresión (9.3). Los mismos datos obtenidos de las probetas cúbicas con dosificación 4:1 se indican en la tabla 9.2.

En la primera de las tablas se puede observar como el factor de carbonatación de todas las probetas se mueve en un rango muy ajustado, con un valor medio de $k_{3:1} = 1,65$. Las probetas de las series 2, 3 y 10 se rompieron todas en la misma época, con unos periodos de carbonatación entre 304 y 316 días, siendo esperable por tanto que el frente de carbonatación tenga la misma profundidad en todas ellas. Por otro lado, las probetas de la serie 1 se han roto con unos periodos de carbonatación distintos, a los 158, 242 y 339 días, presentando valores de factor de carbonatación también muy parecidos entre sí y con la media del resto de series. La densidad de estas cuatro series con la misma dosificación es semejante, según se indica en la tabla 10.1, por lo que los valores de carbonatación obtenidos encajan dentro de lo esperado, obteniendo un valor de k que se relaciona de forma directa con la densidad y la dosificación de las probetas.

Se analizan a continuación los datos aportados por la serie 11 de probetas, que fue construida de forma premeditada con una menor densidad (1,63 g/cm³ frente a los 1,95 g/cm³ de las anteriores series), manteniendo la misma dosificación 3:1. Se observa como el factor de carbonatación es muy superior, alcanzando al menos un valor de 2,59. A la fecha de rotura de la serie, tras un periodo de carbonatación de 372 días, la carbonatación es completa ($d_k = 50$ mm) lo que no asegura que el proceso no se hubiera completado ya con anterioridad, lo que daría

Probeta	Dosificación	Profundidad de carbonatación					Factor de carbonatación (k)
		Fecha de fabricación (t_0)	Fecha de rotura (t_r)	Periodo de carbonatación ($t_r - t_0$) (días)	Prof. carbonatación media (d_k) (mm)		
1.1	3:1	18/02/2019	26/07/2019	158	21,00	1,67	
1.2			18/10/2019	242	24,00	1,54	
1.3			18/10/2019	242	25,50	1,64	
1.4			23/01/2020	339	31,20	1,69	
<i>media serie 1</i>						<i>1,64</i>	
2.1	3:1	13/03/2019	23/01/2020	316	29,80	1,68	
2.2			23/01/2020	316	27,80	1,56	
2.3			23/01/2020	316	30,10	1,69	
2.4			23/01/2020	316	35,70	2,01	
<i>media serie 2</i>						<i>1,74</i>	
3.1	3:1	14/03/2019	23/01/2020	315	30,55	1,72	
3.2			23/01/2020	315	28,60	1,61	
3.3			23/01/2020	315	27,50	1,55	
3.4			23/01/2020	315	28,40	1,60	
<i>media serie 3</i>						<i>1,62</i>	
10.1	3:1	06/05/2019	05/03/2020	304	25,33	1,45	
10.2			05/03/2020	304	26,70	1,53	
10.3			05/03/2020	304	28,61	1,64	
10.4			05/03/2020	304	32,15	1,84	
<i>media serie 10</i>						<i>1,62</i>	
<i>media dosificación 3:1</i>						<i>1,65</i>	
11.1*	3:1	19/02/2019	26/02/2020	372	50,00	2,59	
11.2*			26/02/2020	372	50,00	2,59	
11.3*			26/02/2020	372	50,00	2,59	
11.4*			26/02/2020	372	50,00	2,59	
<i>media serie 11</i>						<i>2,59</i>	

Tabla 9.1: Datos de carbonatación sobre probetas cúbicas de dosificación 3:1

Probeta	Dosificación	Profundidad de carbonatación					Factor de carbonatación (k)
		Fecha de fabricación (t_0)	Fecha de rotura (t_r)	Periodo de carbonatación ($t_r - t_0$) (días)	Prof. carbonatación media (d_k) (mm)		
4.1	4:1	18/03/2019	23/01/2020	311	50,00	2,84	
4.2			23/01/2020	311	50,00	2,84	
4.3			26/02/2020	345	50,00	2,69	
4.4			26/02/2020	345	50,00	2,69	
<i>media serie 4</i>						2,76	
5.1	4:1	25/03/2019	23/01/2020	304	35,05	2,01	
5.2			23/01/2020	304	50,00	2,87	
5.3			23/01/2020	304	37,18	2,13	
5.4			26/07/2019	123	28,50	2,57	
<i>media serie 5</i>						2,40	
6.1	4:1	25/03/2019	23/01/2020	304	46,80	2,68	
6.2			23/01/2020	304	40,00	2,29	
6.3			23/01/2020	304	37,12	2,13	
6.4			23/01/2020	304	37,76	2,17	
<i>media serie 6</i>						2,32	
7.1	4:1	02/04/2019	26/02/2020	330	38,70	2,13	
7.2			26/02/2020	330	42,90	2,36	
7.3			26/02/2020	330	41,61	2,29	
7.4			26/02/2020	330	33,23	1,83	
<i>media serie 7</i>						2,15	
8.1	4:1	02/04/2019	26/02/2020	330	50,00	2,75	
8.2			26/02/2020	330	50,00	2,75	
8.3			26/02/2020	330	50,00	2,75	
8.4			26/02/2020	330	50,00	2,75	
<i>media serie 8</i>						2,75	
9.1	4:1	22/04/2019	05/03/2020	318	50,00	2,80	
9.2			05/03/2020	318	47,50	2,66	
9.3			05/03/2020	318	46,60	2,61	
9.4			05/03/2020	318	44,81	2,51	
<i>media serie 9</i>						2,65	
<i>media dosificación 4:1</i>						2,50	

Tabla 9.2: Datos de carbonatación sobre probetas cúbicas de dosificación 4:1

un valor de factor de carbonatación aún mayor. Teniendo en cuenta el factor de carbonatación medio obtenido de las otras cuatro series de la dosificación 3:1 ($k=1,65$), el periodo de tiempo necesario para una carbonatación completa de las probetas sería de 918 días, frente a los 372 días que ha necesitado la serie 11. Este dato pone de manifiesto la gran influencia que la densidad provoca en la velocidad de carbonatación, como ya se había indicado anteriormente.

Si se analizan los datos que aparecen en la tabla 9.2, tomados sobre las series de probetas cúbicas de dosificación 4:1, se vuelve a observar una aceptable relación entre todos ellos, con un valor medio de todas las series de $k_{4:1} = 2,50$, sin que aparezcan valores discordantes. Únicamente las probetas 5.1, 5.3, 6.3, 6.4, 7.1 y 7.4, presentan una dispersión superior al 15 % sobre el valor medio de toda la serie. Al igual que en el caso de la serie 11, varias probetas presentan un estado de carbonatación completo, por lo que su factor de carbonatación podría ser superior al calculado, ya que podrían haber completado el proceso en un tiempo inferior.

El valor medio de las series de la dosificación 4:1 es muy superior al de las series de dosificación 3:1, indicando que la carbonatación de éstas última queda ralentizado por la propia carbonatación superficial, en un proceso de autobloqueo de la permeabilidad a la difusión del dióxido de carbono.

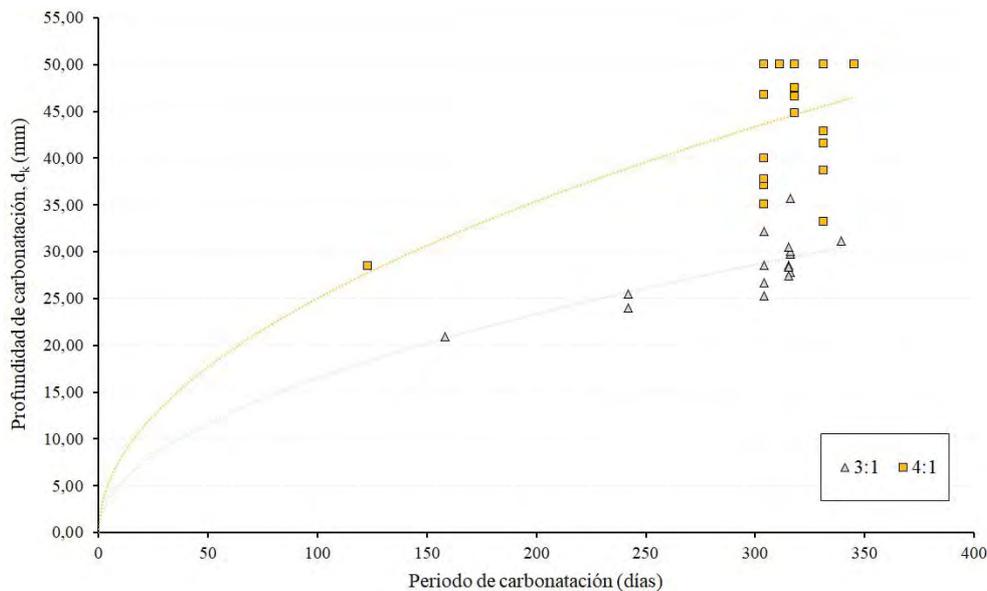


Figura 9.2: Curvas de carbonatación para las series de probetas cúbicas de dosificación 3:1 y 4:1

En la figura 9.2 se muestra la relación entre profundidad de carbonatación (d_k) y el periodo de carbonatación en días de las probetas estudiadas. Se representa también la curva que recoge los valores medios de ambas dosificaciones. La forma de dichas curvas manifiesta claramente la diferencia que existe en el valor de factor de carbonatación, y por tanto en la velocidad de carbonatación que en el caso de las probetas de dosificación 3:1 es considerablemente más lenta. Como se ha indicado, varias probetas de la dosificación 4:1 presentan una carbonatación completa, lo que puede indicar que su carbonatación se completó en un periodo inferior al considerado en el estudio y por tanto su velocidad sería superior a la indicada en la figura 9.2, aumentando por tanto la diferencia con la dosificación 3:1.

La finalidad de esta tesis es la completa caracterización mecánica de un tapial tradicional, mediante el empleo de técnicas no destructivas y destructivas, como se ha venido exponiendo anteriormente. Por este motivo los datos de carbonatación de los que se disponen son para periodos superiores a los 300 días, entendiéndose que este es un espacio de tiempo suficientemente amplio para una completa o al menos profunda carbonatación de las probetas. Aún así, y desconociendo en ese momento el papel tan importante que la carbonatación plantea en este material y con la previsión de poder corroborar la propia fiabilidad del estudio, se rompieron inicialmente dos probetas (una por cada dosificación) a una edad inferior a la prevista.

Así, el 26 de julio de 2019 se rompió la probeta 1.1, fabricada con una dosificación 3:1 y tras un periodo de carbonatación de 158 días. La profundidad de carbonatación medida fue $d_{k-1,1} = 21,00$ mm, lo que supone un factor de carbonatación $k_{1,1} = 1,67$. El mismo día se rompió la probeta 5.4, de dosificación 4:1 y con un periodo de carbonatación de 123 días. La profundidad de carbonatación medida en este caso fue $d_{k-5,4} = 28,50$ mm, y por tanto un factor de carbonatación $k_{5,4} = 2,57$. Estos datos indicaban que el efecto del autobloqueo ya se estaba produciendo, en espesores en torno a los 20 mm. Para corroborar este efecto, y descartar un posible fallo en la probeta, el día 18 de octubre de 2019 se rompieron otras dos probetas de la serie 1, probetas 1.2 y 1.3, con un periodo de carbonatación de 242 días. En este caso la profundidad de carbonatación medida fue $d_{k-1,2} = 24,00$ mm y $d_{k-1,3} = 25,50$ mm, lo que supone factores de carbonatación de $k_{1,2} = 1,54$ y $k_{1,3} = 1,64$, siendo estos factores muy cercanos al obtenido previamente sobre la probeta 1.1, y corroborando la existencia del mecanismo de autobloqueo.

Con los datos obtenidos de estas probetas se calculó el periodo de carbonatación total, obteniendo un periodo de 378 días para la dosificación 4:1 y de 953 días para la 3:1 (calculado a partir del valor medio de k obtenido sobre las tres probetas 1.1, 1.2 y 1.3). El primero de los periodos obtenidos, pese a ser dilatado para un estudio de tesis, era alcanzable, si bien el segundo (953 días) era imposible de conseguir. Se asume por tanto que el núcleo de las probetas de dosificación 3:1 podría quedar sin carbonatar ya que el efecto del autobloqueo hace que la velocidad en esa zona sea extremadamente lenta. Así, se fija en un 15 % a 20 % de la sección total el área máxima sin carbonatar asumible, entendiéndose que su efecto sobre las pruebas mecánicas no debe tener una gran influencia y encontrando así un equilibrio entre todos los ensayos a realizar.

Con esas premisas se calcula un núcleo sin carbonatar aceptable de 42 x 42 mm, lo que supondría un área de 1.764 mm², siendo esta un 17,64 % de la sección total. Tendiendo en cuenta la velocidad de carbonatación obtenida en ese momento sobre las probetas de la serie 1, $k = 1,62$, las condiciones de tamaño de núcleo impuestas se alcanzaría en 320 días. Si se calcula el volumen del núcleo sin carbonatar asumido (74.088 mm³) sobre el volumen total de la probeta, éste supondría un 7,41 %.

En ese mismo periodo de carbonatación calculado de 320 días, las probetas de dosificación 4:1 alcanzarían teóricamente una profundidad de carbonatación de 46 mm, lo que supone una sección sin carbonatar de 64 mm² que representaría un 0,64 % de la sección total, lo que se puede entender como una carbonatación completa, como así ha ocurrido finalmente con varias probetas.

Si se revisan los datos que aparecen en la tabla 5.2, donde se resumen los valores máximos de resistencia a compresión, se observa como la serie de probetas 1 presenta el menor de los valores, con una carga máxima de 2,03 MPa, lo que significa una reducción en torno a un 20 % de la media de todas las series. Esta reducción de carga se ve directamente ligada a una carbonatación insuficiente en la serie, provocada por la rotura temprana para obtener los datos de carbonatación indicados previamente. Algo similar le ocurre a la probeta 5.4, presentando un valor de resistencia máxima a compresión de 2,22 MPa, siendo por tanto el menor de su serie.

9.2. Desarrollo de la carbonatación en las sub-probetas cúbicas ssP

Un proceso semejante al anterior se ha utilizado para evaluar la influencia de la carbonatación en los datos mecánicos sobre las sub-probetas cúbicas ssP. Para ello se fabricó una probeta prismática de sacrificio con una dosificación 3:1, y con unas medidas de 440.100.100 mm, que se mantuvo en condiciones de laboratorio durante 48 días. Una vez transcurrido ese periodo la probeta se dividió por la mitad, con la ayuda de un cincel y un martillo, y se midió el frente de carbonatación, siendo $d_{k-ssP} = 19,42$ mm (figura 9.3).



Figura 9.3: Carbonatación de la probeta prismática de sacrificio. Dosificación 3:1

El resultado obtenido superó la valor esperado, ya que para esa dosificación 3:1 el factor de carbonatación que se obtuvo de la probeta cúbica 1.1 era $k_{1,1} = 1,67$, y por tanto la profundidad de carbonatación esperada estaba en torno a los 11,57 mm. El valor obtenido por tanto de factor de carbonatación es $k_{ssP} = 2,80$, siendo el utilizado para ajustar los plazos para la realización de los ensayos de fractura. Así, al igual que que el caso anterior, se asume que se pueden realizar los ensayos con una sección no carbonatada en el interior de las probetas, que en este caso se limita al 10 %. Se estima por tanto que este nivel de carbonatación se alcanzará en torno a los 115 días después de la fabricación.

A la vista de que el valor del factor de carbonatación obtenido es alto, se decide llevar la carbonatación a término en todas las sub-probetas resultantes, hecho que se calcula ocurriría en torno a los 318 días. El cálculo se realiza con una sub-probeta de dosificación 3:1, por lo que se entiende que las sub-probetas de dosificación 4:1 alcanzarían la completa carbonatación algún tiempo antes. Los ensayos de compresión sobre las sub-probetas se realizan entre los días 10 y 20 de julio de 2020, lo que supone periodos de carbonatación entre 385 y 428 días. El periodo de carbonatación se vio incrementado ante la imposibilidad de acceder al laboratorio por las condiciones sanitarias del año 2020. Esta modificación del periodo de carbonatación no supuso ninguna alteración en los resultados, asegurando la completa carbonatación de todas las sub-probetas cúbicas ssP.

Recuperando nuevamente los datos recogidos en la tabla 5.2 se observa como las sub-probetas cúbicas ssP presentan un valor de carga máxima a compresión superior al de las probetas cúbicas (3,73 MPa frente a 2,58 MPa), pudiendo ser fácilmente relacionado con la completa carbonatación de la primeras. De hecho el incremento entre la series de dosificación 3:1 de ambos grupos es especialmente significativo. De haber podido ajustar el ensayo de compresión a los 318 días calculados se podría haber comprobado si la curva de carbonatación sobre el tapial puede ajustarse simplemente a \sqrt{t} o si se ajustaría mejor a una valoración más compleja de factor tiempo. Así es posible que para periodo cortos de tiempo de carbonatación el factor de carbonatación sea alto en dosificaciones altas, produciéndose el autobloqueo a partir de una determinada profundidad o espesor de costra.

Capítulo 10

Control de la pérdida de peso en las probetas

Durante el siguiente capítulo se analizarán los datos obtenidos del control de variación de peso de las probetas, quedando fijados los valores finales de las densidades del material. Una vez obtenidos esos valores se comparan con las variaciones que los ensayos no destructivos de UPV han ido mostrando a lo largo del proceso de variación de humedad, pudiendo establecer una serie de paralelismos entre ambos valores. Los datos obtenidos ya han sido indicados en la memoria de la tesis, ya que la exposición no corresponde temporalmente con la obtención de los datos.

Para las probetas cúbicas se muestran los valores de las series, como media de los de las cuatro probetas que la forman, mientras que en las probetas prismáticas se muestran los de cada una de las probetas.

Se ha realizado un control de la evolución del peso de las probetas, como medida de la pérdida de humedad. Esta pérdida de humedad se relaciona con el agua sobrante de amasado, aquella que no pasa a formar parte del propio tapial, ya sea en forma de agua de fraguado como en forma de agua atrapada en el interior. Para la toma de datos se utiliza una balanza de precisión modelo GEO15 de la marca Ohaus. Se toman medidas desde el momento de su fabricación y durante un periodo de 22 días, poniendo de manifiesto que a partir de esa fecha las variaciones ya no se producen por el agua sobrante de amasado, sino por las condiciones de humedad ambiental, por lo que se da por concluida la toma de datos. En las tablas 10.1 y 10.2 aparecen los datos de la densidad media inicial y final de cada serie de probetas, junto con el % de pérdida de densidad a los 22 días¹. La pérdida de peso se relaciona de forma directa con la pérdida de humedad en las probetas. La densidad media final se calcula también a los 22 días de la fabricación.

¹Los datos de pérdida de peso de cada probeta se pueden consultar en el apéndice H. Los datos que aparecen en la tabla 10.1 son los valores medios de cada una de las series. Los datos de cada de las probetas cúbicas pueden consultarse en el apéndice I.

Serie Dosificación 3:1	Agua de amasado (%)	Densidad media (g/cm ³)		Variación pérdida de peso (%)	Agua final (%)
		inicial	final		
1	9	2,23	2,04	-8,16	0,92
2	10	2,16	1,99	-7,69	2,50
3	8	1,98	1,88	-5,05	3,10
10	9	2,06	1,90	-7,65	1,46
11 ^a	9	1,78	1,63	-8,19	0,88
Dosificación 4:1					
4	8	2,03	1,92	-5,27	2,87
5	9	2,11	1,98	-6,53	2,63
6	10	2,20	2,05	-6,91	3,32
7	9	2,13	2,01	-5,54	3,65
8	8	2,07	1,93	-6,78	1,31
9	10	2,21	2,04	-7,51	2,69

Tabla 10.1: Valores medios de cambio de densidad y contenido en agua durante los primeros 22 días en probetas cúbicas

^aLa probeta 11 se fabrica con una densidad menor de forma intencionada, para poder comparar el comportamiento de probetas de menor de densidad en los ensayos posteriores

Serie Dosificación 3:1	Agua de amasado (%)	Densidad media (g/cm ³)		Variación densidad (%)	Agua final (%)
		inicial	final		
P-1	9	2,17	2,00	-7,68	1,43
P-2	9	2,16	1,99	-7,92	1,17
P-3	9	2,17	1,99	-8,61	0,43
P-4	9	2,10	1,94	-7,81	1,29
P-5	9	2,10	1,94	-7,40	1,73
P-6	9	2,18	2,01	-7,82	1,28
Dosificación 4:1					
P-7	9	2,16	1,99	-7,76	1,34
P-8	9	2,19	2,02	-7,81	1,29
P-9	9	2,14	1,98	-7,70	1,40
P-10	9	2,22	2,04	-7,81	1,29
P-11	9	2,20	2,02	-8,02	1,06
P-12	9	2,19	2,02	-7,73	1,37

Tabla 10.2: Valores medios de cambio de densidad y contenido en agua durante los primeros 22 días en probetas prismáticas

En relación a la velocidad de pérdida de humedad no se ha encontrado una variación sustancial entre las distintas probetas, ni se han obtenido resultados análogos a los indicados por Schroeder (2011), si bien se puede indicar que los valores de humedad se estabilizan tras la primera semana. Los cambios más pronunciados se acumulan en los primeros tres días, con variaciones en la mayor parte de los casos de más del 70 % de la pérdida de humedad total.

10.1. Análisis de los resultados obtenidos

Analizando los datos que aparecen en las tablas 10.1 y 10.2 se puede observar como de forma general a mayor cantidad de agua de amasado se obtiene una mayor densidad en las probetas. Este hecho viene directamente relacionado con los datos que se hubieran obtenido de un ensayo proctor sobre el suelo seleccionado, en el que se hubiera encontrado el punto óptimo de agua de amasado (Hall y Djerbib, 2004). También se obtienen densidades mayores en las probetas con un menor contenido en cal (relación 4:1), lo que supone por tanto una mayor cantidad de tierra en la probeta, más densa que la cal.

La variación de la densidad que aparece en las tablas 10.1 y 10.2 coincide con la pérdida de peso, dado que evidentemente el volumen de las probetas es fijo. De esa manera se puede calcular la cantidad de agua que permanece en el interior de las probetas, ya de forma estable como agua incorporada al material. Así, como se puede ver en dichas tablas, las cantidades finales de agua en las probetas disminuye de una forma muy notable, con valores para las cúbicas en torno al 2,5 %, con ciertas diferencia en función de la cantidad inicial de agua. En la probetas prismáticas el valor de agua final está en torno al 1,25 %, con valores muy estables entre las distintas muestras. Aún así se sigue apreciando la tendencia a un mayor porcentaje de agua en las probetas con dosificación 4:1 frente a las de relación 3:1, si bien la diferencia es pequeña.

En la tabla 10.3 se comparan los resultados de las densidades de las probetas y series con las dosificaciones y con el porcentaje de agua de amasado.

Probetas	Agua de amasado (%)	Dosificación		Incremento (%)
		3:1	4:1	
Cúbicas	8	1,88	1,92	2,1
	9	1,97	1,99	1,0
	10	1,99	2,04	2,5
Prismáticas	9	1,98	2,01	1,5

Tabla 10.3: Comparación de resultados de densidad con agua de amasado y dosificación

Como se puede observar la dosificación 3:1 presenta siempre valores de densidad inferiores a los obtenidos de la dosificación 4:1. Así, para un porcentaje de agua de amasado del 8 %, la dosificación 3:1 muestra un valor de densidad de 1,88 g/cm³ frente a 1,92 g/cm³ de la dosificación 4:1, lo que supone un incremento de un 2,1 %. Para un porcentaje de agua de amasado del 9 % las probetas con una dosificación 3:1 tienen un valor de densidad de 1,97 g/cm³, frente a los 1,99 g/cm³ de las probetas con dosificación 4:1, lo que significa un aumento del 1,0 %. Por último, para una cantidad de agua de amasado del 10 % las probetas con relación 3:1 alcanzan una densidad de 1,99 g/cm³, mientras que las fabricadas con una proporción 4:1 llegan a los 2,04 g/cm³, lo que representa un aumento del 2,5 %. En las probetas prismáticas ocurre un efecto similar, con una densidad media de 1,98 g/cm³ para las fabricadas con una dosificación 3:1, y 2,01 g/cm³ para las de dosificación 4:1, lo que equivale a un incremento del 1,5 %.

Si se revisan los resultados de la tabla 10.3 en función de la cantidad de agua incorporada al

amasado en cada una de las dosificaciones se comprueba que se produce igualmente un aumento en la densidad. Así para la relación 3:1 se produce un incremento del 4,8 % entre una cantidad de agua de amasado del 8 al 9 %, y un incremento posterior del 1,0 % si el agua de amasado utilizada es de un 10 %. El mismo efecto se produce en las probetas con dosificaciones 4:1, donde se produce un aumento de un 3,6 % de densidad al utilizar un 9 % de agua frente al 8 %, y un 2,5 % más si la cantidad de agua es del 10 %. Los valores no son en principio muy llamativos ya que rondan entre el 1 y el 4,8 %, si bien debe tenerse en cuenta el efecto de las dos opciones a la vez (agua de amasado + dosificación).

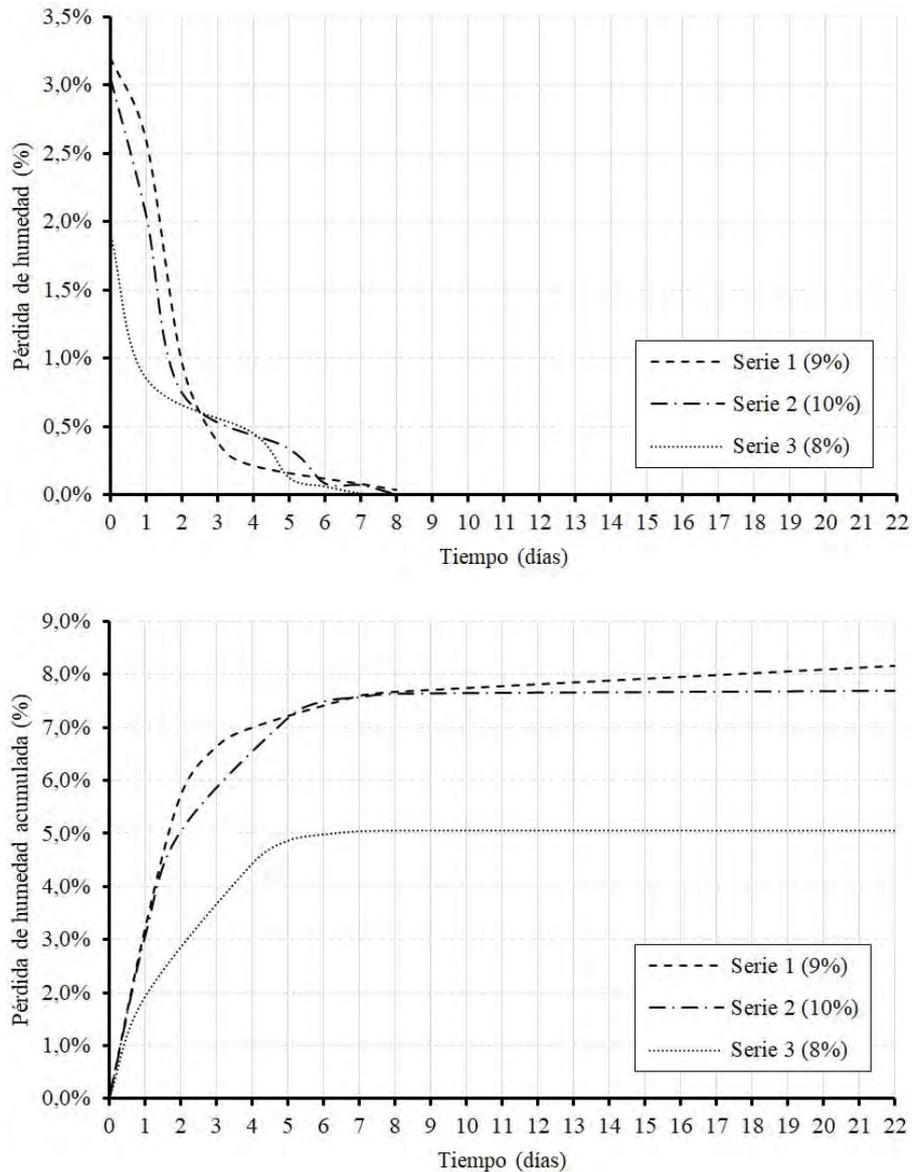


Figura 10.1: Curvas de pérdidas de humedad en series de probetas cúbicas. Dosificación 3:1

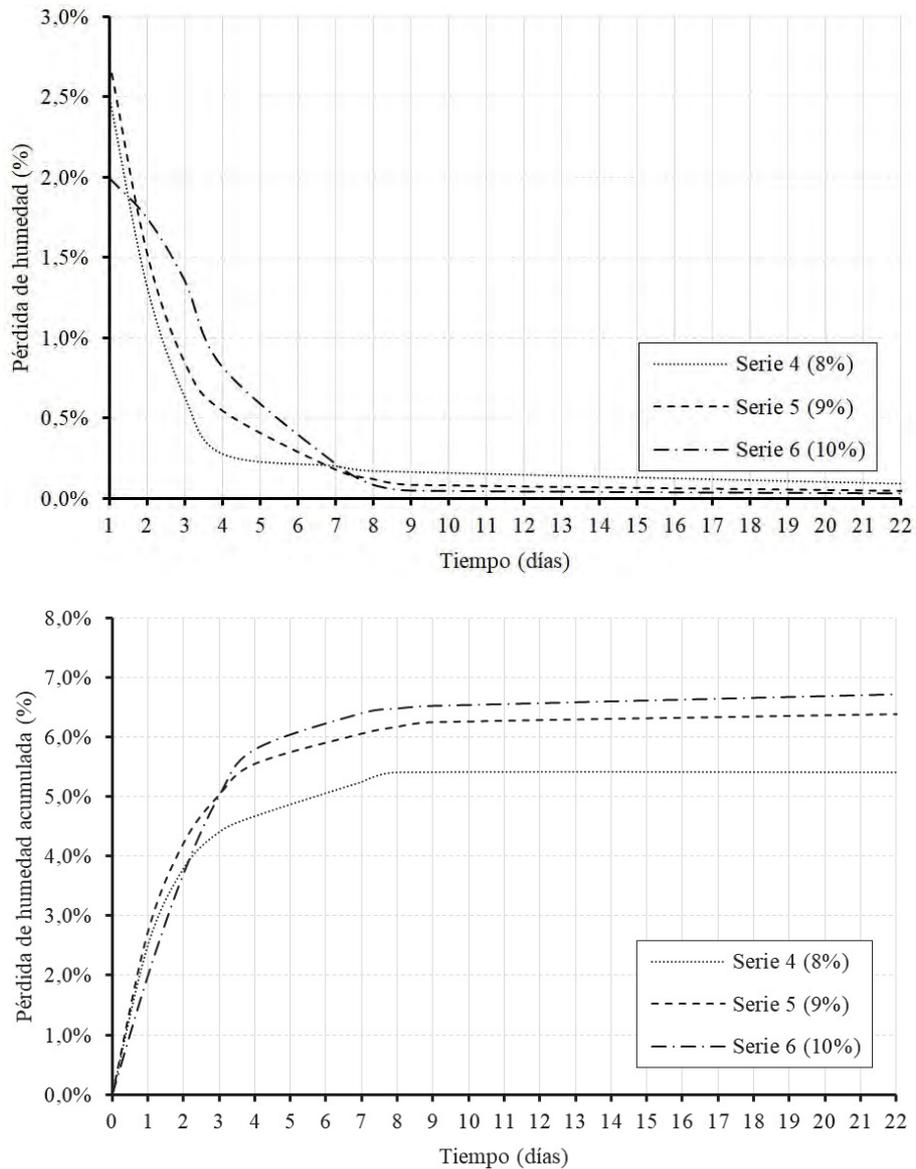


Figura 10.2: Curvas de pérdidas de humedad en series de probetas cúbicas. Dosificación 4:1

En las figuras 10.1 y 10.2 se muestran las curvas de pérdidas de humedad de las series de probetas cúbicas, donde se resume de manera gráfica lo indicado anteriormente. Se observa como las series con un porcentaje inferior de agua de amasado presentan una menor pérdida de peso, si bien la evolución temporal es muy parecida en todas ellas.

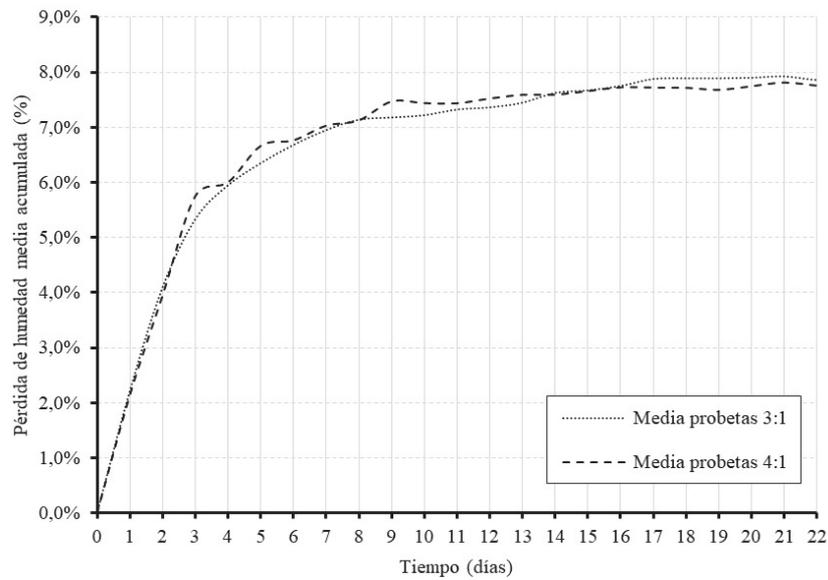


Figura 10.3: Curva de pérdidas de humedad media acumulada en probetas prismáticas

Para las probetas prismáticas, que presentan todas un valor de agua de amasado del 9 %, se hace una comparación de los valores medios de pérdida de humedad acumulada en función de la dosificación. En la figura 10.3 se aprecia como no hay diferencia entre ambas dosificaciones, indicando que la pérdida de peso está relacionada de forma exclusiva con la cantidad de agua de amasado, no influyendo en ésta la dosificación empleada.

Capítulo 11

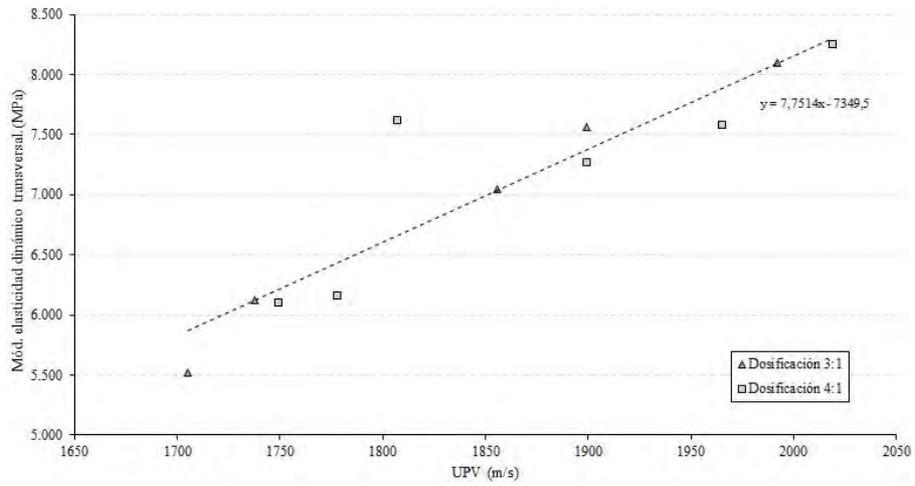
Contraste de resultados y correlación de los obtenidos con diferentes técnicas

En este capítulo se sintetizan y contrastan los resultados y relaciones que se han ido obteniendo durante los ensayos expuestos anteriormente, comenzando por los ensayos no destructivos y a continuación los resultados destructivos, para concluir mostrando las correlaciones obtenidas entre ellos.

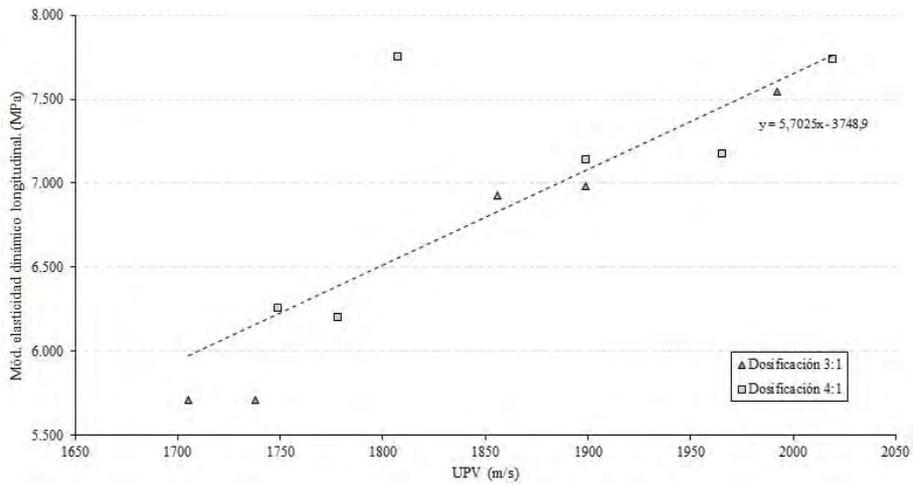
11.1. Contraste de resultados. Ensayos no destructivos

En la figura 11.1 aparecen las correlaciones entre los valores obtenidos de módulos dinámicos a partir de los ensayos FFRF con los valores aportados por las medidas de UPV para las probetas prismáticas. Se relacionan módulos dinámicos, que son los obtenidos directamente de los ensayos, en lugar de módulos estáticos, cuya determinación viene afectada por una expresión matemática a partir de los dinámicos. De manera general se puede indicar que existe una alta relación entre los módulos dinámicos transversal y longitudinal con los datos de UPV, siendo en cambio menos clara con los valores de rigidez transversal. En el primero de los casos expuestos en la figura indicada, correlación módulo de elasticidad dinámico transversal - UPV (figura 11.1 a) se obtiene un valor de coeficiente de correlación $R=0,92$, mientras que en el segundo caso, correlación módulo de elasticidad dinámico longitudinal - UPV (figura 11.1 b) el coeficiente de correlación es $R=0,83$. Estos datos ponen de manifiesto que existe una gran correlación entre ambos métodos no destructivos, quedando fuertemente vinculados.

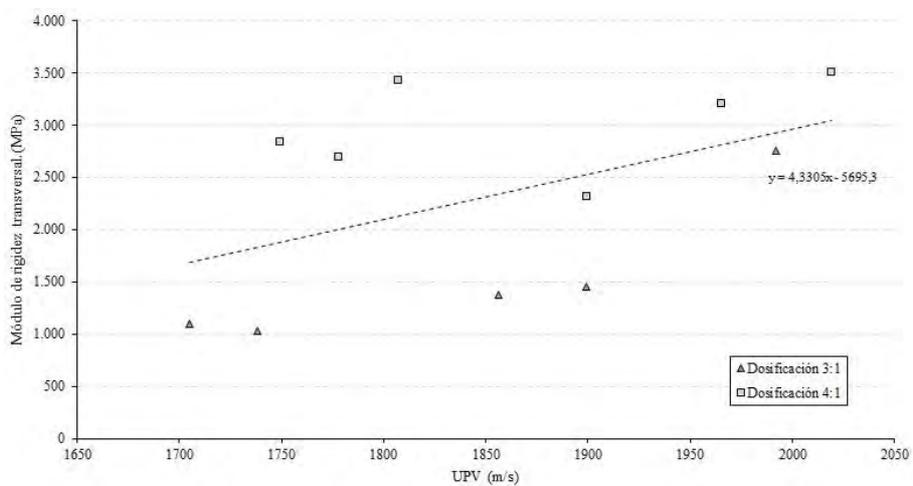
Por otro lado, al analizar los datos de la correlación entre el módulo de rigidez transversal dinámico y UPV (figura 11.1 c) se comprueba como el valor del coeficiente R es de $0,50$. Este valor indica que la correlación ya no es tan estable. Como se verá a continuación, las correlaciones con el módulo de rigidez transversal dinámico van a ser siempre bajas, no sólo al compararlas con los resultados de UPV, sino también con los propios resultados de FFRF. Así, de la figura 11.2, donde se han representado las relaciones entre los datos obtenidos en los tres



(a) Mód. elasticidad dinámico transversal - UPV

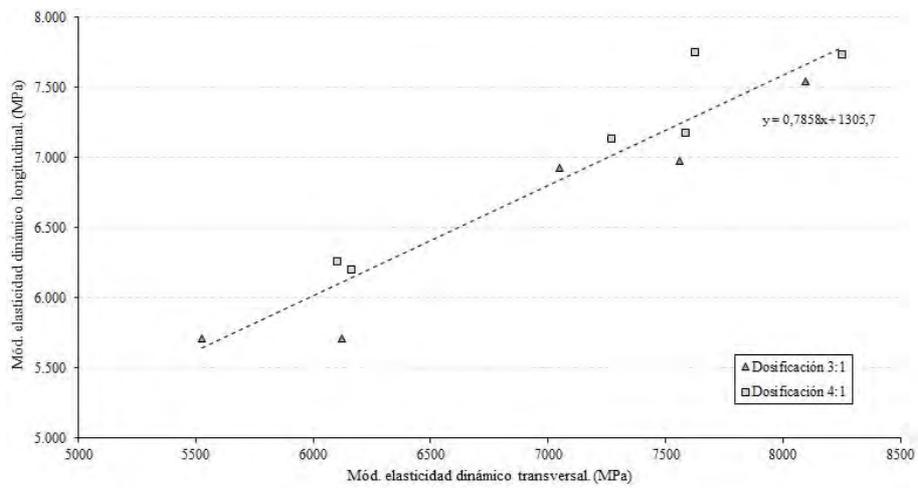


(b) Mód. elasticidad dinámico longitudinal - UPV

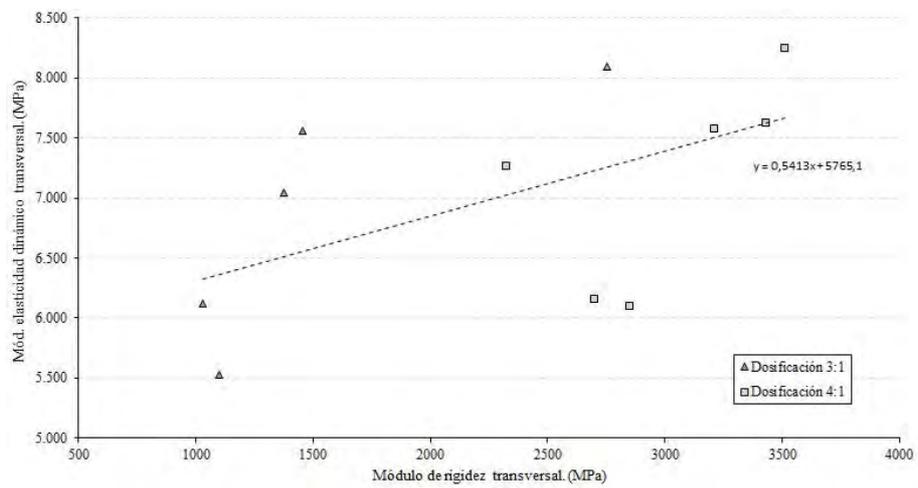


(c) Mód. rigidez transversal dinámico - UPV

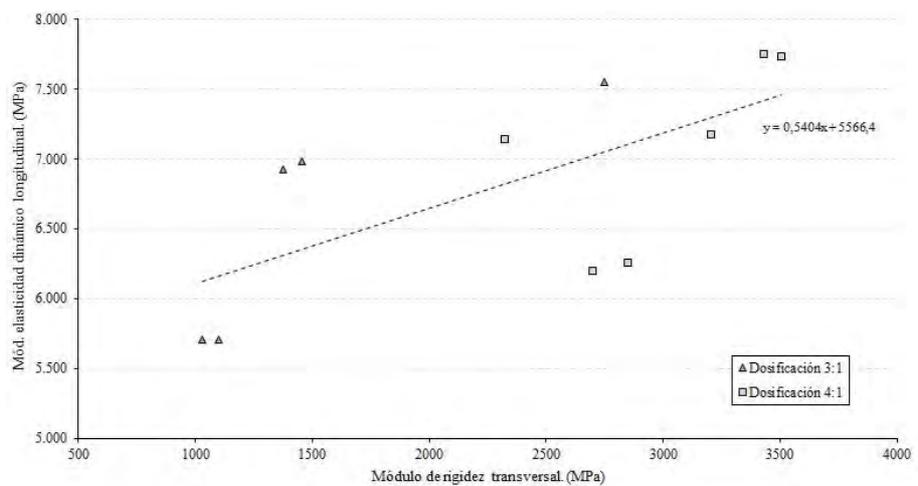
Figura 11.1: Correlaciones entre módulos dinámicos y UPV. Probetas prismáticas



(a) Mód. elasticidad dinámico longitudinal - transversal



(b) Mód. elasticidad dinámico transversal - rigidez transversal



(c) Mód. elasticidad dinámico longitudinal - rigidez transversal

Figura 11.2: Correlaciones entre módulos dinámicos en ensayos FFRF. Probetas prismáticas

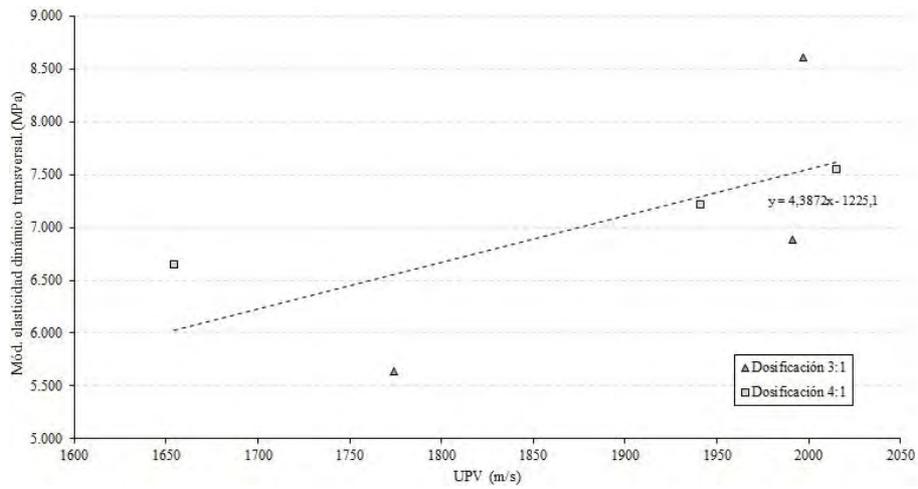
modos de vibración de los ensayos FFRF, se obtiene un valor de correlación entre los módulos dinámicos longitudinal y transversal de $R=0,95$, como ya se adelantaba en el capítulo 8. En cambio, las correlaciones de estos dos modos con el módulo de rigidez transversal bajan hasta valores de $R=0,56$ para el transversal-rigidez transversal y $R=0,67$ para el longitudinal-rigidez transversal.

Algo parecido ocurre al analizar los resultados de los ensayos no destructivos realizados sobre las probetas cúbicas, si bien presentan sus propias singularidades. En este caso los valores de factor de correlación entre los ensayos FFRF y UPV son algo menores que en las probetas prismáticas, debido probablemente al reducido tamaño de las probetas en relación al mínimo indicado, como ya se ha comentado en el capítulo 8 al describir los resultados sobre las probetas cúbicas tras ser sometidas al ensayo FFRF. Así, el factor de correlación entre los datos de módulo de elasticidad dinámico transversal y UPV (figura 11.3 a) es $R=0,66$, mientras que para el modo longitudinal (figura 11.3 b) es $R=0,77$. Por otra parte no es posible encontrar una relación entre el módulo de rigidez transversal y UPV con los datos obtenidos.

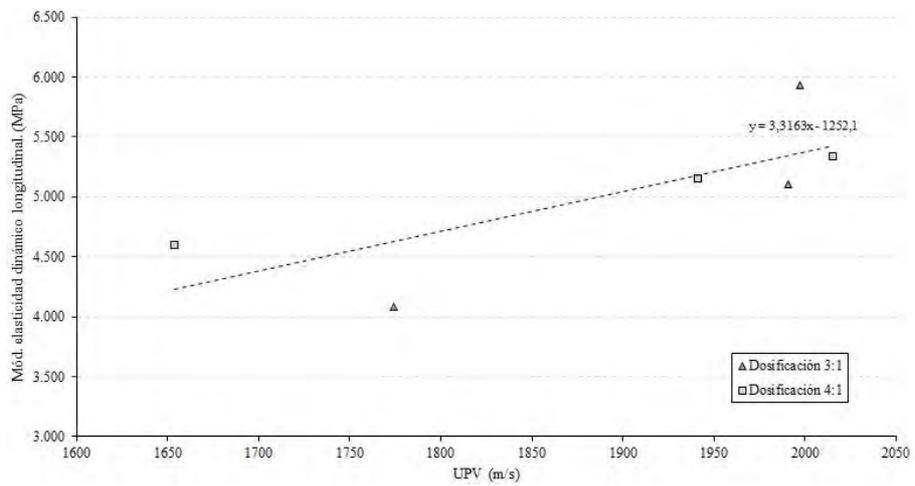
Al analizar las correlaciones entre los valores de módulos de elasticidad dinámicos aportados por los ensayos FFRF sobre las probetas cúbicas (figura 11.4) se obtienen valores de correlación semejantes a los obtenidos sobre las probetas prismáticas. Así, se obtiene un valor de correlación entre los módulos dinámicos longitudinal y transversal de $R=0,98$, ($0,95$ en las prismáticas), remarcando la buena relación entre ambos datos. Por otro lado la correlación entre módulo de elasticidad transversal y de rigidez transversal es de $R=0,70$ ($0,56$ en prismáticas) y $R=0,61$ para el longitudinal-rigidez transversal ($0,67$ en prismáticas). Como se puede observar el comportamiento de las correlaciones es análogo, manteniendo las diferencias entre los datos obtenidos según los modos de vibración.

A la luz de estos resultados de correlación se puede formular una expresión que relacione los datos de UPV con el módulo de elasticidad dinámico transversal obtenido mediante FFRF, que presenta un valor $R=0,92$. Los datos de ambos ensayos se relacionan mediante la expresión (11.1), para valores de $E_{din.transv}$ en MPa y UPV en m/s.

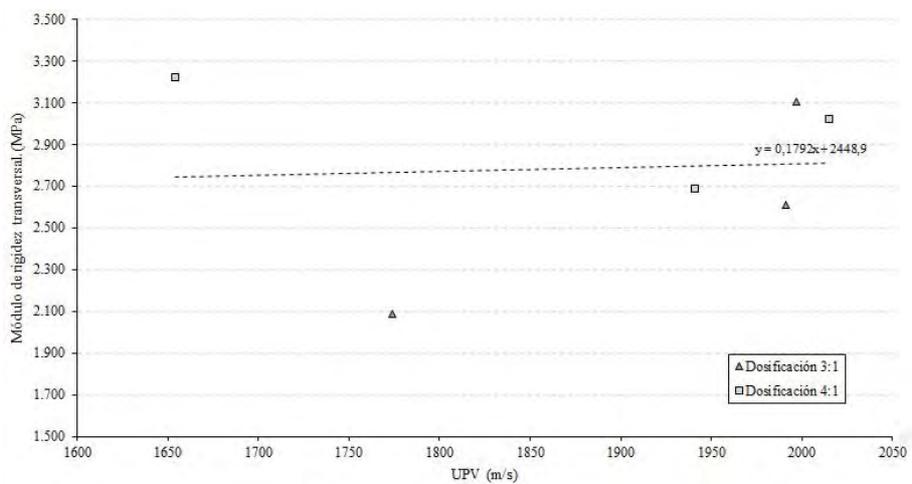
$$E_{din.transv} = UPV^{2,09} \cdot 10^{-3} \quad (11.1)$$



(a) Mód. elasticidad dinámico transversal - UPV

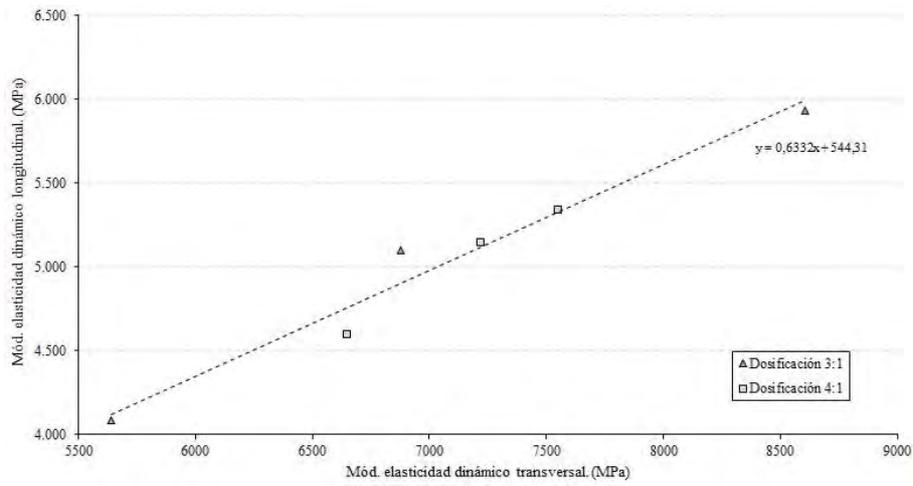


(b) Mód. elasticidad dinámico longitudinal - UPV

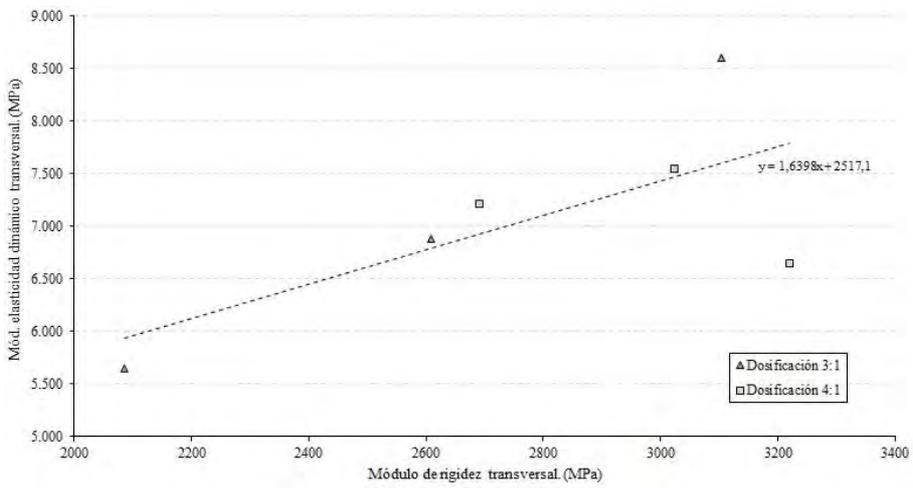


(c) Mód. rigidez transversal dinámico - UPV

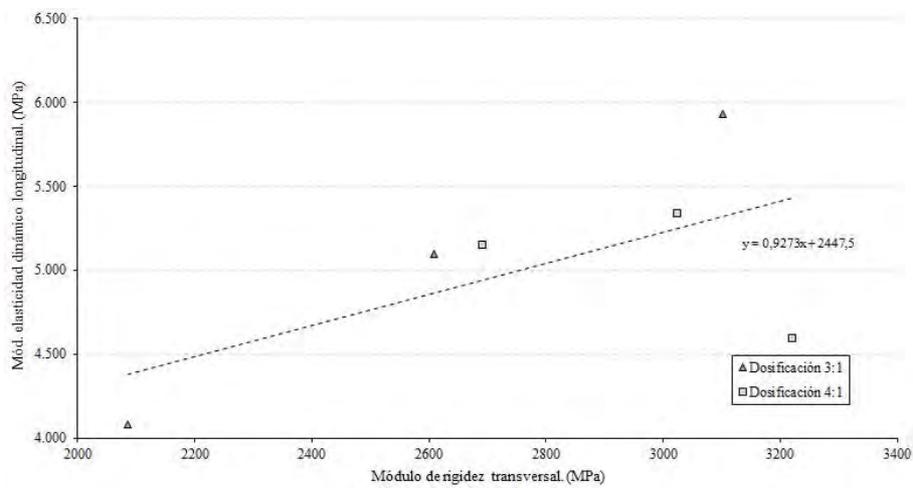
Figura 11.3: Correlaciones entre módulos dinámicos y UPV. Probetas cúbicas



(a) Mód. elasticidad dinámico longitudinal - transversal



(b) Mód. elasticidad dinámico transversal - rigidez transversal



(c) Mód. elasticidad dinámico longitudinal - rigidez transversal

Figura 11.4: Correlaciones entre módulos dinámicos en ensayos FFRF. Probetas cúbicas

11.2. Contraste de resultados. Ensayos no destructivos

Una vez argumentadas las correlaciones entre los ensayos no destructivos, en las que se han indicado tanto los modos y ensayos que muestran valores altos de relación como aquellos en la que ésta es menos clara, se procede ahora a presentar de manera sintética los resultados de los ensayos destructivos y su relación con los valores numéricos obtenidos de los no destructivos.

Así, en la figura 11.5, se representan las relaciones entre los valores de carga máxima a compresión, módulo de elasticidad secante, energía de fractura y módulo de elasticidad mediante ciclos, siendo estos dos últimos datos obtenidos exclusivamente sobre las probetas ssP, provenientes de la prismáticas originales. No se ha utilizado el módulo secante obtenido sobre las probetas ssP ya que los datos indican de su materialidad estaba ya muy alterada tras los sucesivos ensayos realizados sobre ellas. En la primera de las relaciones (figura 11.5 a) se comparan los resultados de la carga máxima a compresión de las sub-probetas ssP y su módulo elástico (ciclos), obteniendo un factor de correlación $R=0,41$, excesivamente bajo como para poder buscar una expresión que relaciones ambos datos. Algo parecido ocurre con las probetas cúbicas en la figura 11.5 b, con un factor $R=0,45$, que tampoco asegura una relación entre ambos. Aún más alejado queda la relación entre la energía de fractura y el módulo elástico (ciclos) que aparece en la figura 11.5 c, en el que se ha evitado el uso del módulo de elasticidad calculado según la expresión de Jenq y Shah (1985), al no haber encontrado la base en la que se fundamenta, y por tanto si su transposición al estudio del tapial es posible.

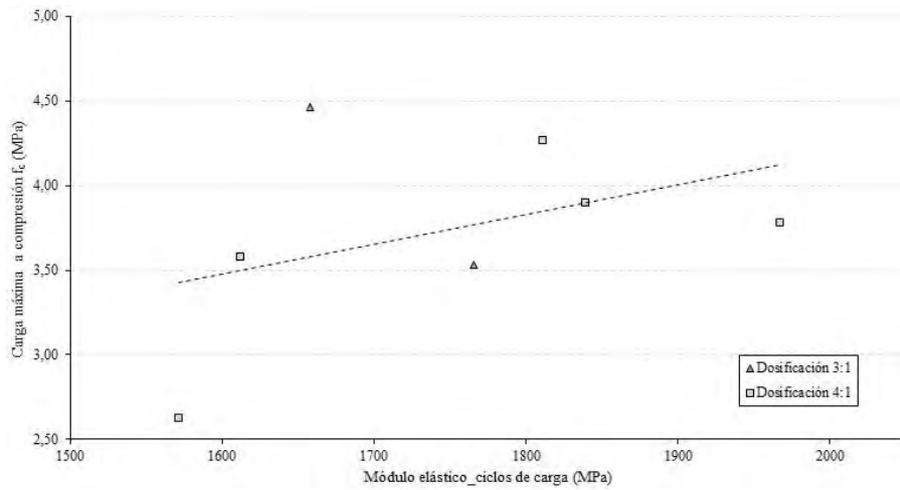
Por otro lado, al analizar las posibles relaciones de los datos aportados mediante los ensayos destructivos de fractura con los datos previamente obtenidos de UPV y densidad, indicados en la figura 11.6 se constata que no es posible llegar a encontrar una expresión que los ponga en común, ya que la dispersión que presentan es muy alta, marcando esta figura exclusivamente la diferencia que la dosificación hace aparece en los valores de G_f , diferencia que ya se analizaba en el capítulo 6.

Continuando con el estudio de las correlaciones en la tabla 11.1 se relacionan a modo de resumen los resultados más significativos de todos los ensayos realizados, divididos en función de la dosificación empleada. Se aportan por separado los datos de las probetas cúbicas originales y de las probetas prismáticas. En éstas el valor de f_c se refiere al obtenido de las sub-probetas cúbicas ssP.

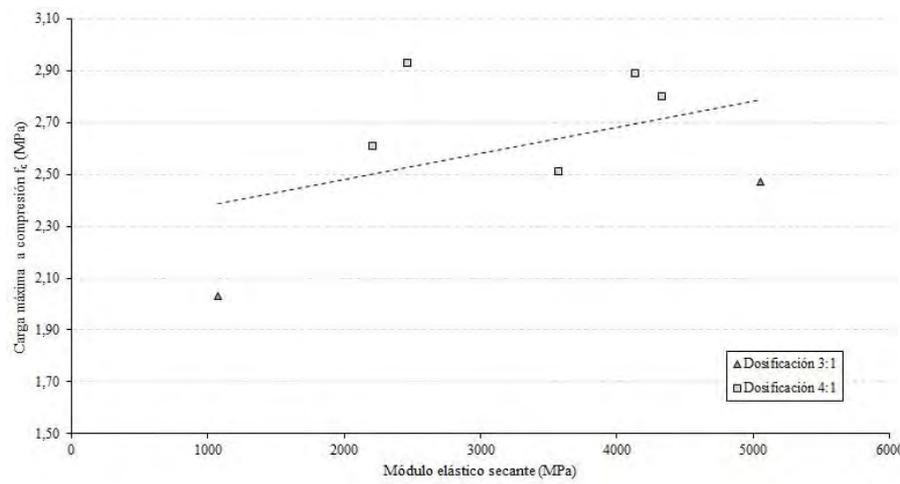
	Dosificación	ρ (g/cm ³)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	E_{prensa} (MPa)	E_{ciclos} (MPa)	E_{UPV} (MPa)	$E_{FFRF.tran}$ (MPa)	$E_{FFRF.long}$ (MPa)	G_F (N/m)	ν
Probetas cúbicas	3:1	1,95	2,56	-	3626	-	4252	5982	4194	-	0,30
	4:1	1,99	2,64	-	-	-	4455	-	-	-	0,33
Probetas prismáticas	3:1	1,98	4,00	0,49	-	1787	4639	5952	5897	33,95	0,25 - 0,35
	4:1	2,01	3,63	0,44	-	-	4565	-	-	23,25	0,24 - 0,30

Tabla 11.1: Datos resumen de valores más significativos en función de la dosificación y tipo de probeta

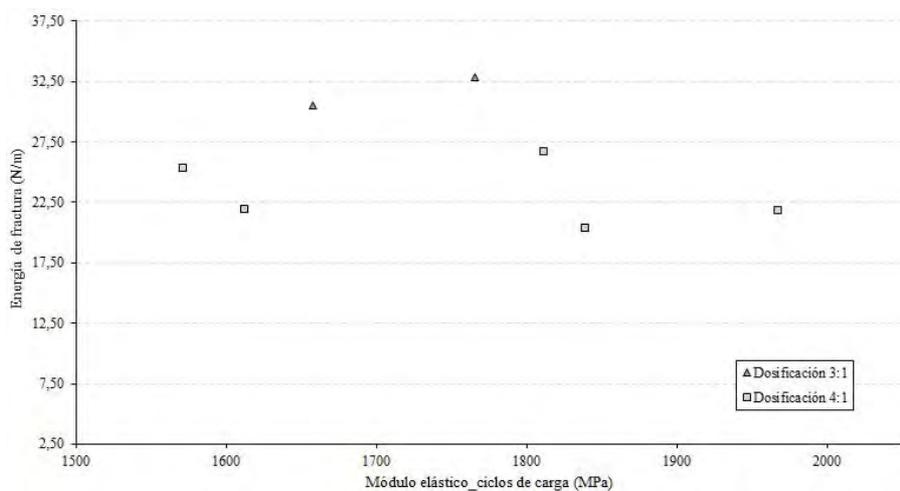
Los resultados que no aparecen indicados (marcados con un guión) son aquellos que no se han calculado por diversos motivos, como ausencia de datos o alteración de las probetas en ensayos previos.



(a) Carga máxima de compresión - Módulo de elasticidad $ciclos$. Probetas prismáticas

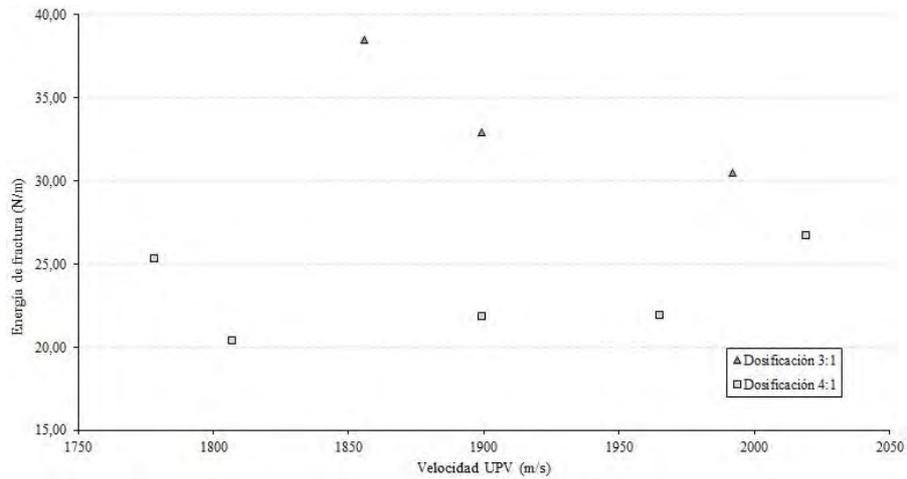


(b) Carga máxima de compresión - Módulo de elasticidad secante. Probetas cúbicas

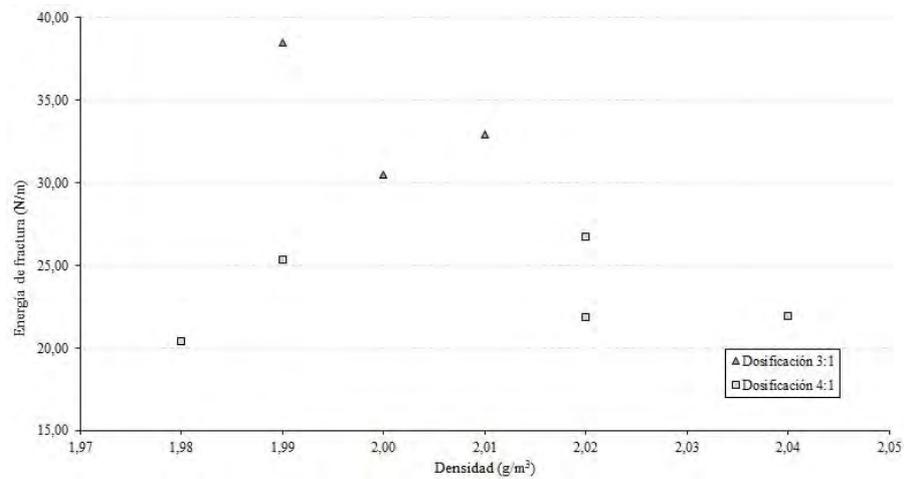


(c) Energía de fractura - Módulo de elasticidad $ciclos$. Probetas prismáticas

Figura 11.5: Correlaciones entre resultados ensayos destructivos



(a) Relación energía de fractura - UPV. Probetas prismáticas



(b) Relación energía de fractura - UPV. Probetas prismáticas. Probetas prismáticas

Figura 11.6: Correlaciones de la energía de fractura con UPV y densidad

11.3. Correlación de resultados. Módulo de elasticidad

El primero de los datos mecánicos a analizar, una vez recopilada toda la información anterior, es el módulo de elasticidad, sin que se distingan los datos particulares de cada una de las dosificaciones. Los valores obtenidos mediante los ensayos destructivos, ensayos más habituales para caracterizar el material, muestran un valor medio en torno a los 3626 MPa, valor que se podría entender como final y a partir del cual analizar los otros resultados obtenidos con técnicas no destructivas.

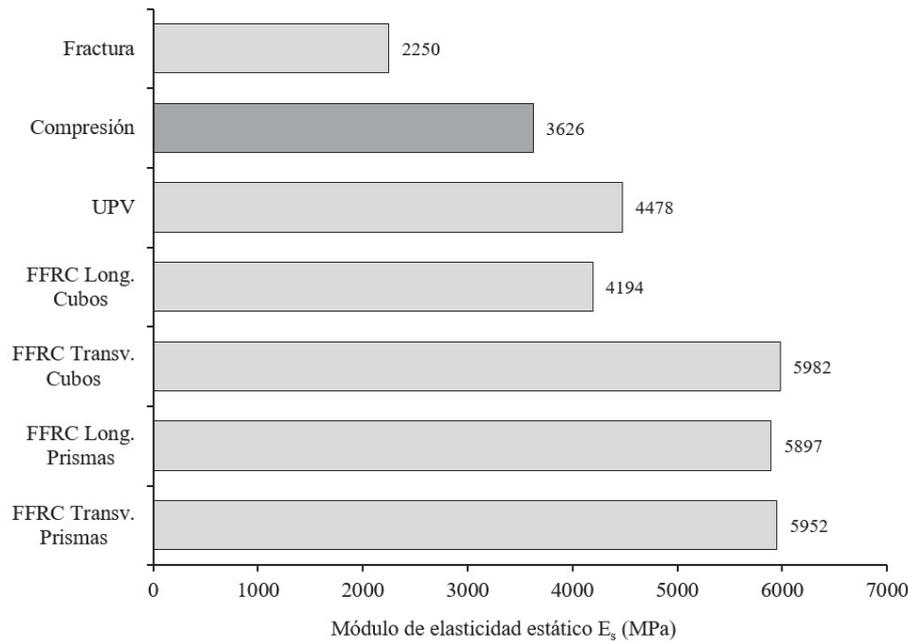


Figura 11.7: Valores de módulo de elasticidad en probetas de tapial

Respecto a los valores de módulo de elasticidad obtenidos a partir de los datos suministrados por el ensayo de fractura se puede observar que difieren de los considerados como finales en un porcentaje en torno al 40 %, porcentaje que puede parecer muy alto pero no lo es al realizar la comparación de forma cuantitativa. La forma de obtener los valores de módulo de elasticidad a partir de los ensayos de fractura fueron desarrollados por [Jenq y Shah \(1985\)](#) para el hormigón, mediante la expresión (6.2). En ella aparece un factor corrector que toma su valor de las condiciones geométricas de las probetas, por lo que como ya se ha indicado sería necesario complementarlo para las particularidades del tapial.

La principal de esas particularidades, y que enlazaría con la relación de módulos elásticos entre el método destructivo y los END, es su gran densidad en relación a sus capacidades mecánicas. Así, el hormigón en masa y el tapial comparten un valor de densidad casi idéntico de 2 g/cm^3 , mientras que sus capacidades mecánicas están muy alejadas. Es importante recordar que mientras que el módulo de elasticidad secante obtenido sobre probetas de tapial está en torno de los 3626 MPa el del hormigón HA-25 estaría en torno a los 27.000 MPa, lo que da un orden de magnitud de la diferencia entre ambos. Por lo tanto, la obtención de módulos mediante técnicas no destructivas, en las que se utilice la densidad o la masa de la probeta puede estar desviando el valor de las capacidades del tapial, y por tanto pueden, a partir de los datos obtenidos, corregirse

para este material.

Otro de los motivos para la diferencia reside en el tipo de módulo calculado, ya que los métodos END aportan valores de módulo de elasticidad estático a partir del dinámico, con la participación de la expresión de Nagy (1997) y la dudas que puede suscitar, mientras que del método destructivo se han obtenido datos del módulo secante al 40 % de la carga máxima de rotura. Aún así existe cierta cercanía en los datos obtenidos mediante el ensayo destructivo y el UPV, con diferencias en torno al 20 %, que teniendo en cuenta la consideración anterior se puede estimar como aceptable, vistos además los buenos valores de correlación que presenta con los ensayos de FFRF. Por tanto el UPV se podría considerar, a falta de ajustes posteriores, un método fiable para la estimación de los valores de módulo de elasticidad secantes, pudiendo incorporar un factor corrector o de diseño en los cálculos derivados a partir de sus datos, mediante la expresión (11.2), para valores de E_c en MPa y UPV en m/s.

$$E_c = UPV^{2,28} \cdot 10^{-4} \quad (11.2)$$

11.4. Correlación de resultados. Resistencia a compresión

Por otra parte en la figura 11.8 se recogen los valores finales de cada una de las series de probetas y sub-probetas cúbicas, relacionando los valores de carga máxima a compresión obtenidos con los valores de UPV. Pese a la dispersión de los datos se observa una clara tendencia media a presentar un mayor valor de f_c a medida que la velocidad de UPV aumenta, tal y como se marca con la línea de tendencia representada en puntos de color gris. La dispersión se reduce si se analiza de forma separada la relación f_c -UPV que se produce en las probetas prismáticas, con un coeficiente de correlación $R=0.736$, valor que puede corroborar dicha relación.

Sobre esta misma figura se ha marcado una curva de carga máxima de compresión característica estimada ($f_{ck.est}$) en línea de trazos de color negro. Esa curva se obtiene de la expresión (11.3) y representa el valor de carga máxima de compresión (en MPa) que se puede utilizar como dato característico en el caso de poder tomar únicamente datos del material a partir de UPV (en m/s).

$$f_{ck.est} = 0,07\sqrt{UPV} \quad (11.3)$$

En la misma tabla 11.1 se pueden observar también como aparecen relaciones entre los valores de carga máxima a compresión y a tracción, por lo que el valor de la carga máxima característica a tracción $f_{tk.est}$ podría calcularse a partir de la expresión (11.4), siendo muy parecida a la que aparece en Miccoli *et al.* (2015).

$$f_{tk.est} = 0,12f_{ck.est} \quad (11.4)$$

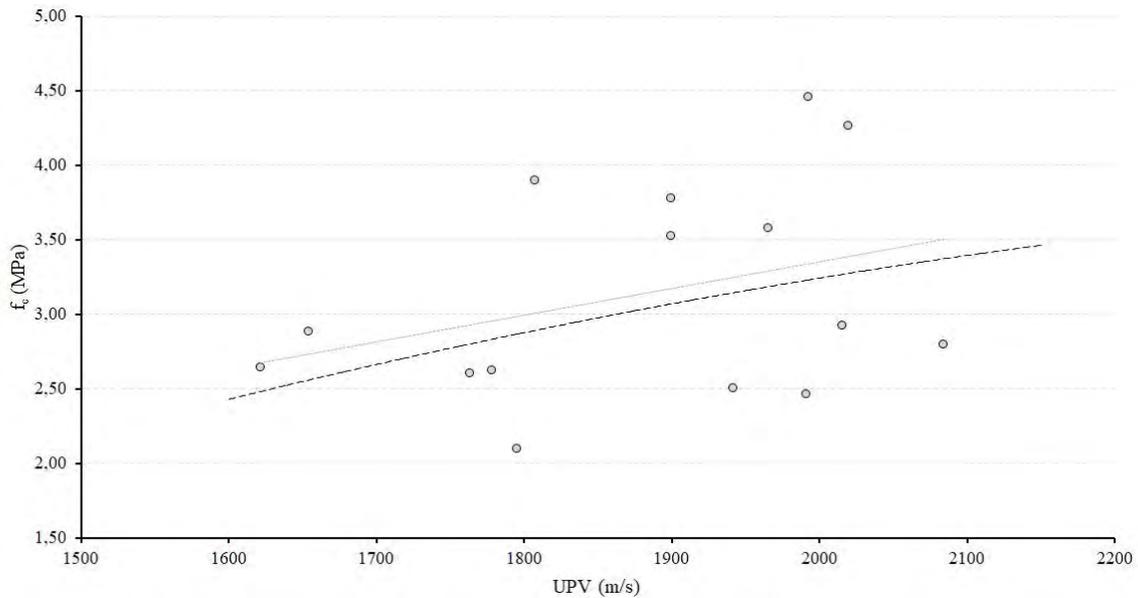


Figura 11.8: Relaciones obtenidas entre UPV y f_c

11.5. Correlación de resultados. Densidad

La última de las correlaciones encontradas se refiere a la obtención de la densidad del material, participando ésta en la primera de las correlaciones indicadas. En este caso, conociendo el valor de UPV (en m/s) de una probeta de tapial se puede obtener una estimación de la densidad (en g/cm^3) mediante la expresión (11.5), quedando las relaciones ρ -UPV de las probetas utilizadas reflejadas en la figura 11.9 donde se dibuja también la curva de la citada expresión. En esta figura aparece también el valor de velocidad y densidad de la probeta 11 (UPV= 1052m/s; $\rho=1,63 \text{ g/cm}^3$) que encaja en la curva de valores adoptada. Esa probeta, ejecutada con una menor densidad, hace que puedan comprobarse el funcionamiento de las expresiones propuestas, ya que se aleja siempre del grupo de datos en el que se mueven todas las demás probetas.

$$\rho = 0,165 \cdot \sqrt[3]{UPV} \quad (11.5)$$

De las expresiones propuestas se pueden obtener datos iniciales de cálculo sobre elementos patrimoniales de los que no se puedan extraer muestras de tamaño suficiente como para poder conocer su densidad, y sin necesidad de someter probetas a ensayos destructivos.

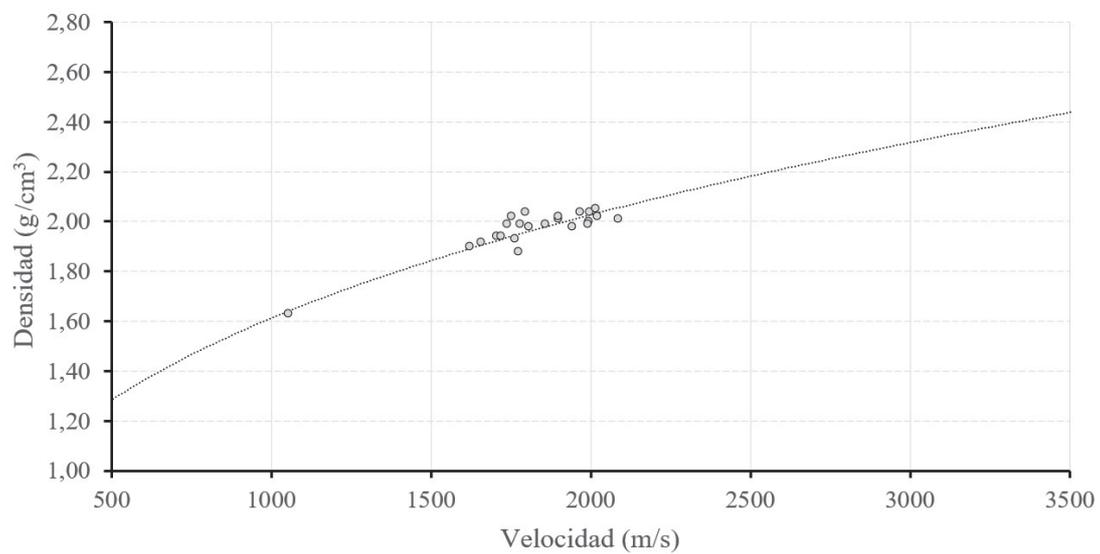


Figura 11.9: Valores de UPV-densidad en las probetas de tapial y curva de relación según la expresión (11.5)

Capítulo 12

Conclusiones

La primera conclusión a la que se puede llegar al redactar esta tesis ya se indicaba al hacer un acercamiento al material a través del trabajo de investigadores anteriores. El tapial histórico es un material complejo de caracterizar y muy variable en sus capacidades mecánicas, fruto de la gran diversidad de materiales que lo pueden componer y de la relación de dosificación entre ellos. Así, los trabajos consultados realizados con anterioridad únicamente acuerdan sus resultados en el valor de la densidad (en torno a $2,00 \text{ g/cm}^3$) y del coeficiente de Poisson (entre 0,20 y 0,30). La densidad también es valorada por la mayoría de los autores como uno de los parámetros que más influyen en la capacidad del tapial ante sollicitaciones mecánicas. Junto a ésta, el contenido en agua es otro de los parámetros físicos más influyentes, quedando éste relacionado de forma directa con la porosidad e indirectamente con la densidad.

La densidad de las probetas fabricadas para la tesis está en torno al valor indicado por los autores consultados ($2,00 \text{ g/cm}^3$) si bien al analizar en detalle la relación entre la densidad y la dosificación o el contenido en agua de amasado aparecen pequeñas diferencias que ponen de manifiesto la influencia de estos factores. Así se comprueba como las probetas fabricadas con dosificaciones 4:1 muestran una tendencia a una mayor densidad, ocurriendo algo parecido con aquellas que tienen una mayor cantidad de agua en su amasado.

Al utilizar la primera de las técnicas no destructivas sobre las probetas, ensayos de velocidad de pulso ultrasónico UPV, se comprueba como existe una evolución clara de los valores aportados en el tiempo. De esa manera se ha podido constatar como la UPV aumenta en las probetas durante un periodo de tiempo similar al de la estabilización por pérdida de humedad, hasta alcanzar un valor estable transcurridos unos 15 días. Los ensayos con UPV muestran también valores mayores para la probetas con dosificación 4:1 (1875 m/s en cúbicas; 1869 m/s en prismáticas), probetas más densas, poniendo de manifiesto la relación entre UPV y densidad. Por su parte las probetas de dosificación 3:1 presentan unos valores de UPV inferiores (1846 m/s en cúbicas; 1818 m/s en prismáticas), si bien el aumento acumulado de velocidad en ambos casos es casi idéntico.

Con los datos obtenidos de UPV, y conocido el valor de la densidad, se pueden obtener

valores de módulo de elasticidad dinámico a partir de la expresión (7.1). En esa expresión participa también el coeficiente de Poisson, que puede ser estimado a partir de datos obtenidos en la literatura ya que es el parámetro menos influyente en dicho cálculo. Se pone de manifiesto que la influencia del coeficiente de Poisson en la precisión del valor del módulo de elasticidad dinámico aumenta con el valor de éste.

Los valores de módulo de elasticidad dinámico calculados a partir de los datos de UPV muestran una diferencia clara entre la dosificación 3:1 y 4:1, con valores medios para la primera dosificación de 4211 MPa, mientras que la segunda llega a 5240 MPa, lo que supone un incremento en torno al 20 %. Esta diferencia entre los módulos de elasticidad aparece también en los resultados de los ensayos mediante la técnica de frecuencia-resonancia (FFRF) si bien, conforme pase el tiempo y se sucedan el resto de ensayos la diferencia tenderá a desaparecer.

Al margen de las diferencias obtenidas sobre las dos dosificaciones, el uso del método FFRF muestra resultados coherentes y satisfactorios, con valores claros y un comportamiento formal parecido al de otros materiales estudiados en mayor profundidad y extensión. El método además se ha presentado como útil para detectar problemas internos en las probetas, y en particular para afecciones por laminación de las tongadas, mostrando en ese caso tanto valores anómalos como autoespectros confusos que anuncian directamente el daño.

Una vez calculados los módulos de elasticidad dinámicos, a partir de los modos de vibración transversal y longitudinal, se constata que existe una buena relación entre ambos, con valores cercanos a 1,0 entre ambos modos de obtener el valor de E_{din} . Una relación menos clara se produce entre los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos y el módulo de rigidez transversal, calculado este último a partir del modo torsional de vibración. Además, el valor del módulo de rigidez transversal muestra una gran diferencia en función de la dosificación de las probetas, mientras que los elásticos apenas son sensibles a ella. La causa puede estar en la forma de vibración del modo torsional, donde el material más movilizadado es el exterior de la probeta, quedando el núcleo menos afectado por el movimiento y por tanto participando menos en la excitación.

A este respecto hay que recordar, como se ha puesto también de manifiesto, el efecto que la dosificación produce en la velocidad de carbonatación, siendo esta más lenta en las probetas con un contenido más alto de cal (dosificación 3:1). De esta manera, a la fecha de realización de los ensayos FFRF, la profundidad de la carbonatación de las probetas 3:1 es inferior a las 4:1, provocando por tanto que el núcleo sin carbonatar de las primeras sea de mayor tamaño. Esta diferencia en la cantidad de material sin carbonatar se pone de manifiesto de una forma más clara en el modo de vibración torsional que en los otros dos, haciéndolo por tanto más sensible a la carbonatación. Este efecto se manifiesta también, de forma lógica, al calcular el coeficiente de Poisson, reflejo éste de los datos obtenidos anteriormente.

Se han ensayado también mediante la técnica de frecuencia-resonancia probetas con una relación 2 entre longitud y sección (denominadas sub-probetas sP), y con una relación 1, denominadas probetas cúbicas y sub-probetas cúbicas ssP. Hay que recordar que ese valor de 2 en la relación dimensional es el límite que la normativa permite para la valoración de los datos obtenidos a partir del modo longitudinal, mientras que diversos autores indican que la relación debe

estar entre 3 y 5 para obtener resultados aceptables. Aun sabiendo que las relaciones dimensionales se encuentran por debajo de lo aconsejable se realizan los estudios para experimentar el comportamiento del material.

Respecto a los resultados obtenidos del ensayo de frecuencia-resonancia sobre las subprobetas sP se puede indicar que los autoespectros muestran comportamientos que se podrían calificar como aceptables, y parecidos a los que se obtuvieron previamente sobre las probetas prismáticas. Se ha comprobado además que el método es capaz de detectar anomalías internas en las probetas que no se manifiestan en el exterior, a través del autoespectro mostrado.

En este caso tampoco se aprecian diferencias en cuanto a los valores de los módulos de elasticidad dinámicos en función de la dosificación empleada, manteniendo la relación de 1,0 entre los E_{din} obtenidos a partir del modo transversal y longitudinal. Tampoco aparecen diferencias en el módulo de rigidez transversal dinámico entre las dos dosificaciones, y se mantiene también el mismo valor de relación con los módulos elásticos dinámicos obtenido en las probetas prismáticas. Los valores del coeficiente de Poisson siguen mostrando diferencias entre las dosificaciones, si bien el rango en el que se mueven oscila dentro de los valores que se pueden entender como esperables y dentro de los obtenidos por los autores consultados.

Respecto de las probetas cúbicas, los autoespectros muestran valores menos claros, con la aparición de un gran número de valores armónicos, aunque el valor de la frecuencia de resonancia sigue siendo identificable. Se observa como aparece una diferencia entre los datos de módulo de elasticidad dinámico en función del modo de excitación de la probeta. Así, mientras que en las probetas prismáticas la relación $E_{din-trans.}/E_{din-long}$ era igual a 1,0, en las probetas cúbicas la relación aumenta a 1,4 - 1,5, lo que ya es indicativo de una incorrección en el método. Por otro lado la relación $E_{din-trans.}/G_{din}$ se mantiene igual que en las prismáticas, por lo que parece deducirse que el modo longitudinal se muestra más sensible al efecto del tamaño.

El efecto de la dosificación no se hace patente al analizar los datos de los modos de vibración transversal y longitudinal, con diferencias muy pequeñas en torno al 1,4 % en el primero y 0,2 % en el segundo. En cambio, al igual que en el caso de las probetas prismáticas, el modo torsional si muestra valores distintos en función de la dosificación, con un incremento del 14,6 % en las fabricadas con una menor cantidad de cal. La diferencia entre ambas dosificaciones mantiene la tendencia que ya se detectó en las probetas prismáticas, si bien su valor se ha visto reducido.

Si se comparan en esta ocasión los datos obtenidos mediante FFRF en las probetas cúbicas con los aportados mediante UPV se constata que la relación ya no es tan clara como ocurría con las probetas prismáticas, lo que se puede interpretar como otro dato que desaconseja el uso de probetas de este tamaño. A su vez, el valor del amortiguamiento se incrementa ligeramente, hasta el 1,0 % de media, mientras que el coeficiente de Poisson para las probetas de dosificación 3:1 muestran ahora valores más bajos y cercanos a los obtenidos sobre sub-probetas sP y por tanto a un valor que se pueda entender como real, en contra de los que se obtuvieron sobre las prismáticas. Por su parte el valor de ν para las probetas de dosificación 4:1 mantiene un valor en el rango de lo esperado.

De los ensayos de fractura realizados sobre las probetas se puede extraer como principal

conclusión que la dosificación afecta a los valores de energía de fractura y tensión máxima de tracción, mientras que el módulo de elasticidad se muestra menos sensible. Los datos obtenidos de G_F para las probetas más ricas en cal son un 46 % superiores a los de la dosificación con menos estabilizante, mientras que el valor de f_t difiere en un 10 %, afectando por tanto a la propia ley de ablandamiento.

Sobre el ablandamiento, al calcular la longitud característica (l_{ch}) y la zona de proceso de fractura (ZPF) se ha podido constatar que la influencia de la dosificación es también muy clara, siendo éste el único parámetro que se distingue entre las probetas, ya que todas ellas están fabricadas con el mismo tipo de tierra y de árido. El comportamiento post-pico está vinculado al desarrollo y forma de la ZPF, y por tanto lo estará también a la dosificación.

Se han obtenido los valores de l_{ch} del tapial, comprobando que sus valores máximos y mínimos están dentro del rango de los calculados para el hormigón en masa por los autores consultados, lo que indica que el comportamiento de ambos materiales es muy similar. A nivel cuantitativo se han obtenido valores de G_F sobre tapial en torno a 1/3 a 1/4 del valor consultado sobre hormigón en masa, dato que sirve como estimación de capacidad y diferencia entre ambos materiales. Aún así, analizando de forma general el comportamiento en fractura del tapial se observa que es totalmente similar al del hormigón en masa, desde un punto de vista cualitativo. Por este motivo se podría considerar el tapial como un material cuasi-frágil que responde al modelo de grieta discreta de Hillerborg.

Además, se han detectado comportamientos no lineales durante la aplicación de la carga uniaxial de rotura, como ya advertían algunos autores en sus estudios sobre hormigón. Por este motivo se calcula el módulo de elasticidad secante en el 40 % de la carga máxima de compresión, ya que se estima que en ese primer tramo el interior del material no ha sufrido aún microfisuraciones entre el árido y la matriz aglomerante, o al menos debe ser pequeña. Por otro lado el uso de los ciclos de carga para la obtención de los módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson se ha demostrado como un modo totalmente aceptable, ya que presenta unos resultados muy parecidos entre todas las probetas. En este caso ya no son detectables diferencias entre dosificaciones.

Por su parte la obtención del módulo secante a partir de los ensayos de rotura muestra un valor medio superior a los datos obtenidos por ciclos de carga, pudiendo ocurrir que el porcentaje estimado del 40 % deba ser ajustado y que además las subprobetas cúbicas ssP presenten un grado de daño superior al provenir de probetas prismáticas sometidas a fractura y su manipulación posterior. En cambio los valores de coeficiente de Poisson calculados mediante los ensayos de compresión sobre los dos grupos de probetas presentan el mismo resultado (0,31 - 0,32), superior al obtenido mediante ciclos de carga (0,24) siendo éste relativamente coincidente con el obtenido mediante el método de frecuencia resonancia.

Al analizar los valores de carga máxima a compresión se comprueba que son relativamente cercanos, si bien las sub-probetas cúbicas ssP muestran valores mayores, pudiendo deberse esta diferencia al proceso de carbonatación en el que se encuentran cada una. A este respecto hay que indicar que se ha constatado una relación directa entre la densidad y la carbonatación, así como con la dosificación empleada. De esta manera las probetas menos densas sufren una carbonatación más rápida, al igual que le ocurre a las probetas con una dosificación más pobre en cal.

La dosificación provoca que el efecto del autobloqueo de la carbonatación sea más intenso en las probetas con mayor cantidad de cal (3:1), lo que hace que los datos obtenidos con los ensayos mecánicos sobre todas las probetas deban ser siempre comparados teniendo en cuenta este efecto. Sobre estructuras patrimoniales el efecto del autobloqueo se debe considerar para conocer el estado interior de las mismas, ya que si bien el tiempo transcurrido desde su ejecución puede ser muy dilatado, el gran espesor que presentan puede hacer que el núcleo del material presente aún un estado de baja carbonatación.

Como ejemplo se puede indicar que, según el factor de carbonatación calculado para la dosificación más alta $k_{3:1}=1,65$, en un periodo de tiempo de 700 años el frente de carbonatación avanzaría unos 83,4 cm, lo que supondría que un muro expuesto por sus dos y de un espesor en torno a los 1,65 estaría completamente carbonatado. Por encima de ese espesor podría ocurrir que aún permaneciera una cierta cantidad del material sin carbonatar. Sin ir más lejos, y como ejemplo claro de la importancia que puede llegar a tener este dato se puede indicar que la propia torre de Comares (construida en torno al primer cuarto del siglo XIV) tiene unos muros que superan claramente ese espesor (figura 12.1).

Finalmente se han obtenido una serie de relaciones entre valores mecánicos y los datos aportados por los ensayos no destructivos realizados mediante UPV. Así, se aportan expresiones que relacionan el módulo de elasticidad, el carga máxima a compresión y la densidad con los valores aportados por los ensayos de UPV, que pueden ser utilizados para la cuantificación de la capacidad mecánica de un determinado material de tapial si necesidad de tomar muestras.

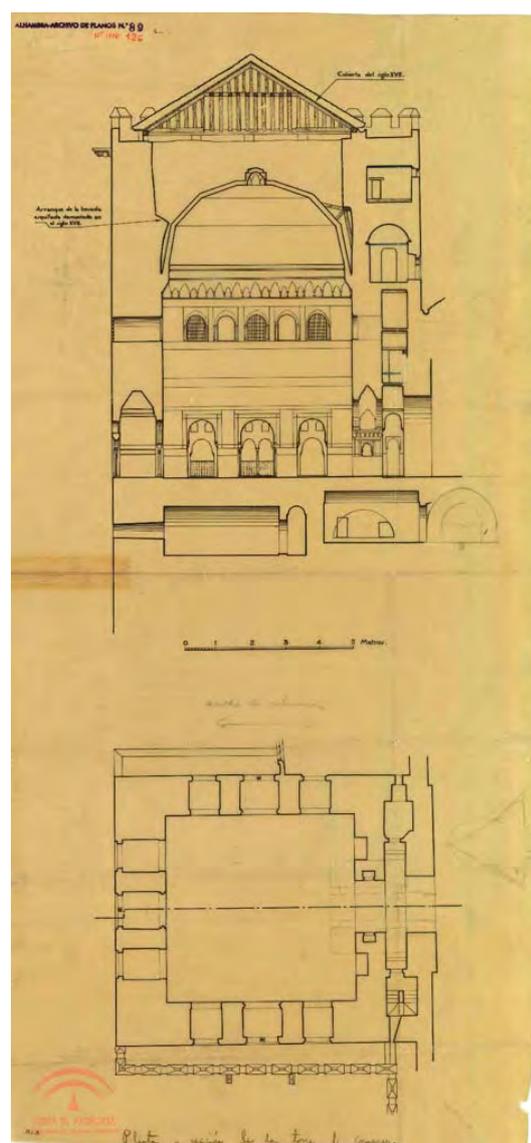


Figura 12.1: Sección y planta de la torre de Comares. Fuente: Archivo del Patronato de la Alhambra y Generalife

Los ensayos realizados, así como los datos y expresiones aportadas en este trabajo de tesis, permiten conocer en mayor profundidad un material como el tapial, tan abundante en patrimonio como desconocido en sus capacidades, sirviendo por tanto como un punto de partida para continuar con la investigación sobre él. Los datos obtenidos permiten además situarlo dentro del resto de materiales constructivos, utilizados tanto en edificios patrimoniales como en nuevas edificaciones. Su conocimiento en mayor profundidad puede servir además para completar un vacío existente en el campo de la mecánica de materiales, tanto para mejorar los análisis de vulnerabilidad sísmica de estructuras patrimoniales como su comportamiento a fractura.

Capítulo 13

Desarrollos futuros

El conocimiento más profundo del material, al que se llega a partir de los datos aportados por esta tesis, permite llenar un vacío de conocimiento que existía sobre las capacidades mecánicas del tapial utilizado en edificaciones patrimoniales. A partir de este punto se abren un gran número de opciones de investigación sobre el propio material, ya sea desde el punto de vista de aplicación al patrimonio como en el futuro desarrollo de sistemas o combinaciones de materiales en nuevas edificaciones. Desde el punto de vista patrimonial, queda pendiente ahora la aplicación directa de los datos aportados en la tesis, mediante campañas de obtención de datos en edificios que corroboren o ajusten los valores alcanzados en este estudio. La propia aplicación de las técnicas no destructivas deberá resolver otra serie de cuestiones como la heterogeneidad del material existente en edificios reales, las modificaciones de sus condiciones en función de las climáticas, la dificultad de aplicación sobre soportes arenosos o deleznable, o la presencia de fisuraciones en el material. Así, las campañas de toma de datos deberán estar precedidas de una anterior en la que se estudie el material desde el punto de vista de su estado de conservación, pudiendo ser necesario el desarrollo de nuevas tipologías de ensayos a partir de las dificultades encontradas.

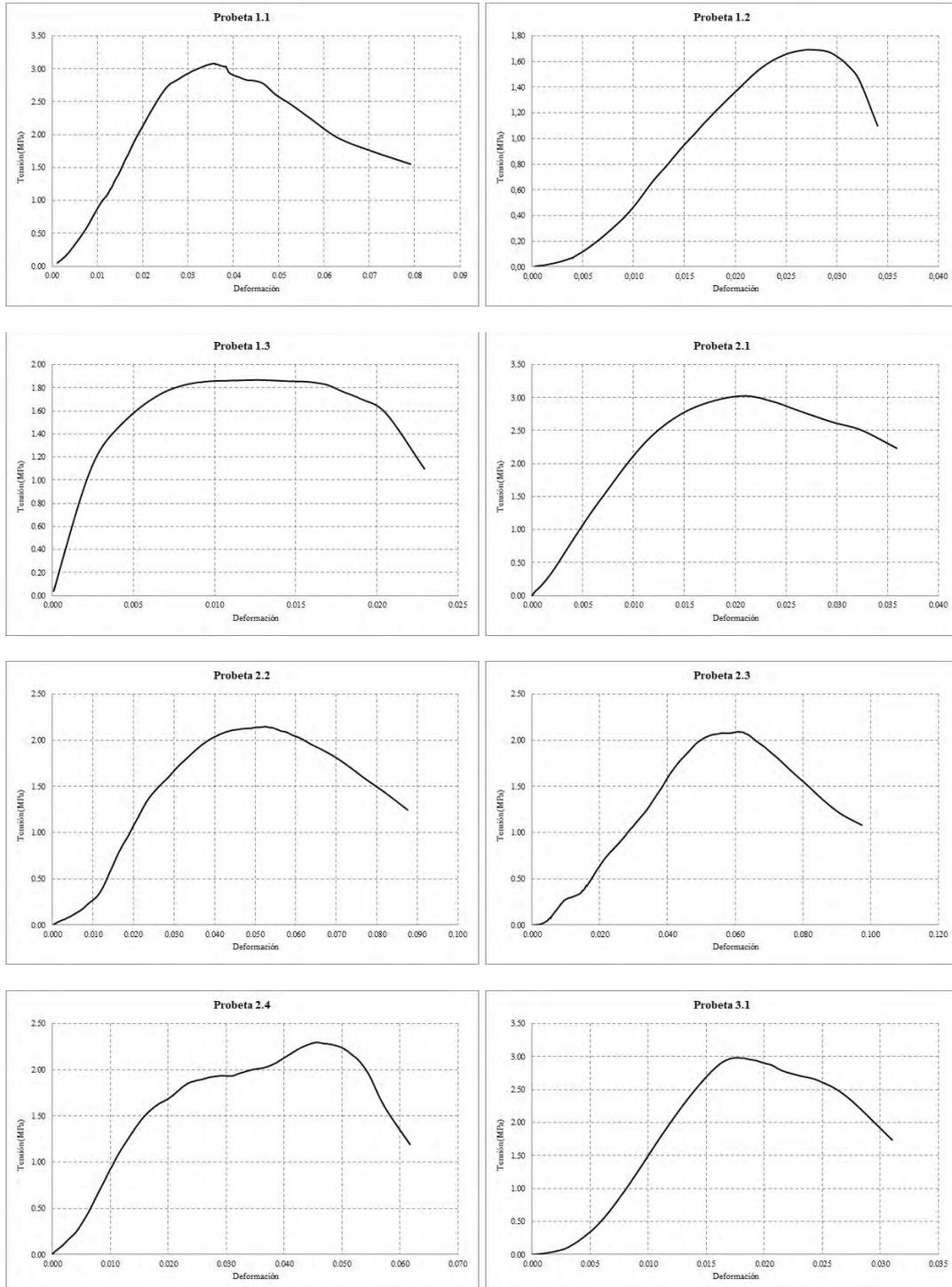
Además, la aplicación de los datos ya obtenidos sobre el material empleado en esta tesis en el modelizado de estructuras mediante FEM puede hacer que los resultados obtenidos sean más precisos, al incorporar datos propios del tapial, sin hacer analogías ni paralelismos con otros materiales. A este respecto es cierto que se han demostrado ciertos paralelismos cualitativos con el hormigón en masa, si bien es necesario proseguir la investigación en cuanto a la influencia de la relación masa/resistencia o en el amortiguamiento en los resultados obtenidos mediante los ensayos de frecuencia resonancia. Por otro lado, a partir de los datos obtenidos de los ensayos FFRF, que demuestran su aplicabilidad al material se abre la posibilidad de ajustar las condiciones del ensayo al material así como de aplicar técnicas de análisis espectral de ondas superficiales sobre muros de mayor tamaño que las probetas estudiadas. Además, el uso de la cal como estabilizante provoca otra serie de variables que es necesario estudiar en mayor profundidad, relacionando velocidades de carbonatación con dosificaciones y densidad del material.

Además de todo lo anterior, relacionado de un modo más directo con el material existente en edificios patrimoniales, existe una aplicación de los datos y técnicas utilizadas en esta tesis para la ejecución de nuevas edificaciones o estructuras con tapial. Así, se pueden analizar los resultados de nuevas composiciones, dosificaciones o el uso de nuevos estabilizantes. Esta rama de investigación tiene un amplio campo de trabajo ya que son muchas y muy variadas las circunstancias en las que se pueden llevar a cabo edificaciones de tapial en distintas localizaciones. Hay que recordar que una de las principales cualidades del material es su versatilidad y facilidad de ejecución, utilizando principalmente materiales locales. La posibilidad de mejorar sus capacidades a través de la composición y el uso de materiales provenientes de desechos de cantera o de otros procesos industriales es otro de los desarrollos futuros que pueden tener un mayor impacto.

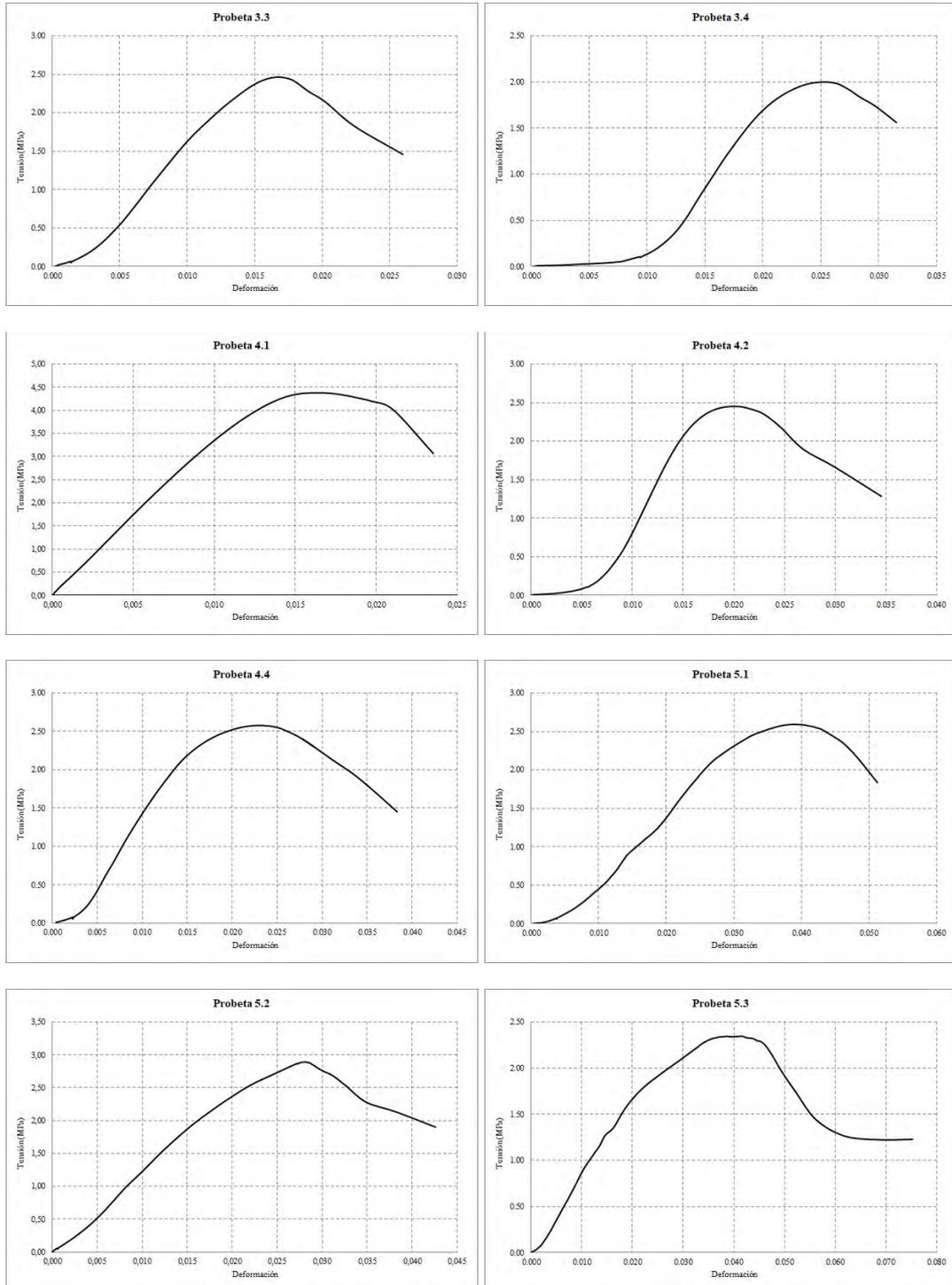
Apéndice A

Curvas de tensión-deformación sobre probetas y sub-probetas cúbicas

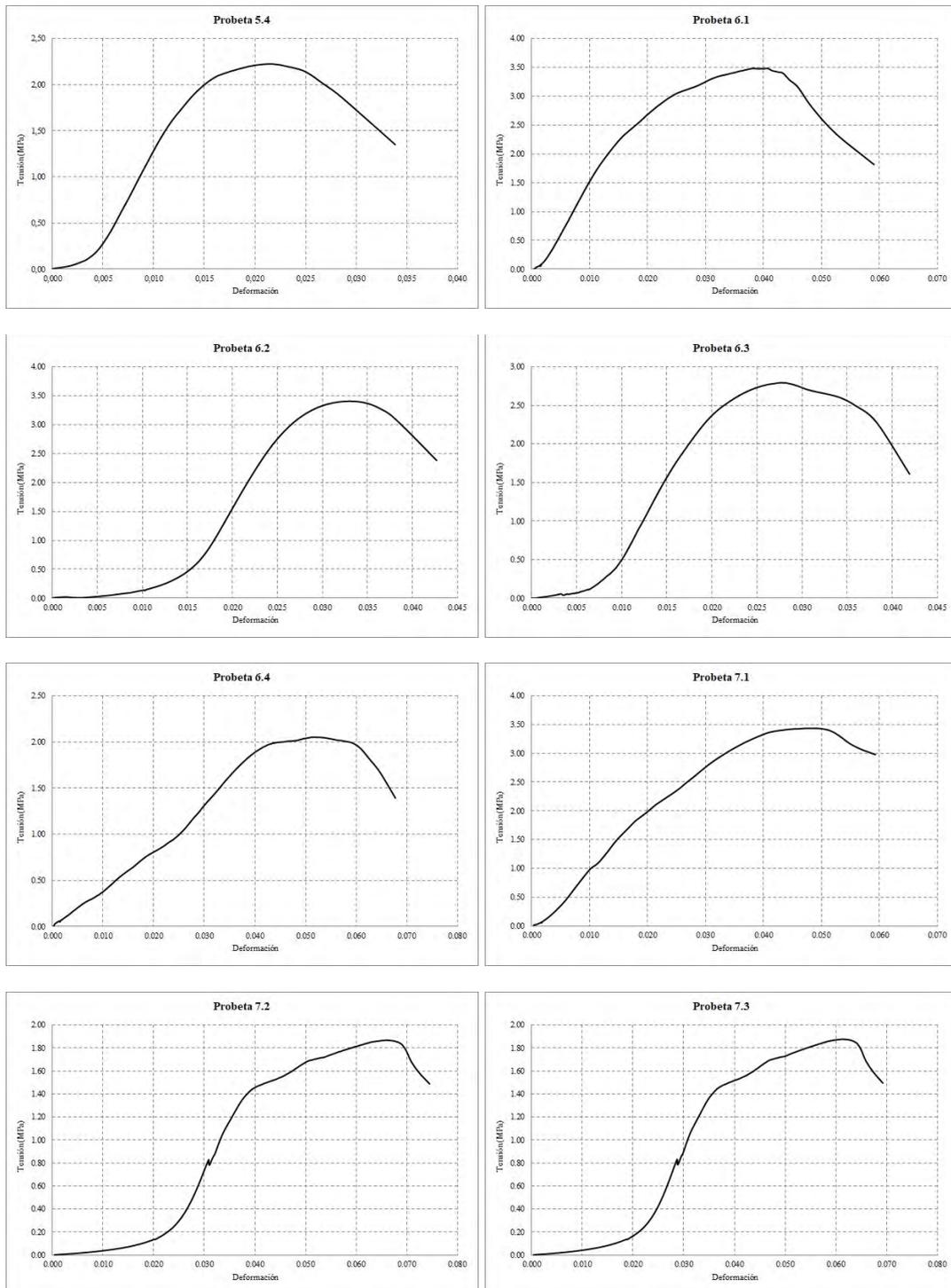
Curvas tensión-deformación de probetas cúbicas obtenidas mediante el actuador (1)



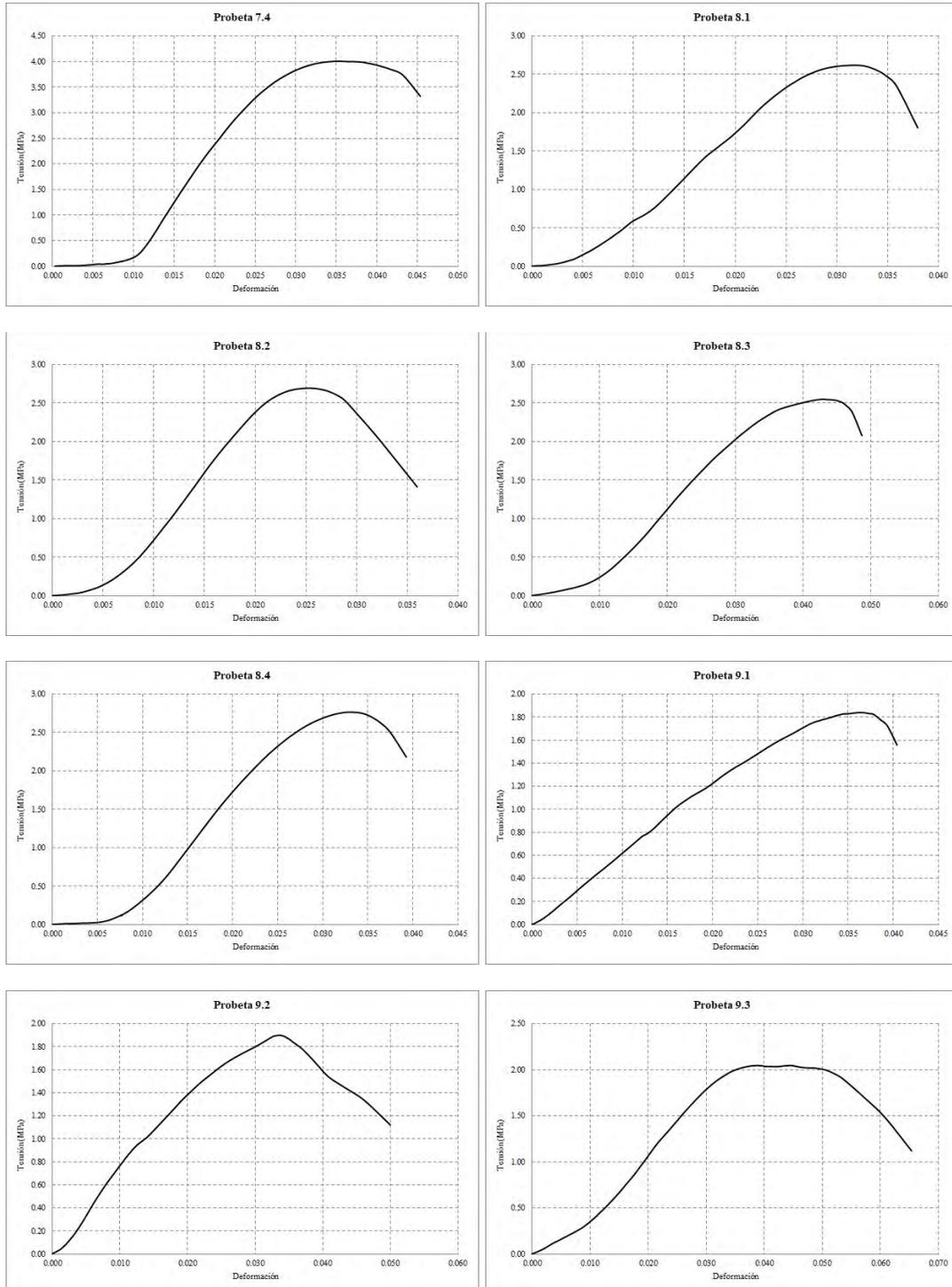
Curvas tensión-deformación de probetas cúbicas obtenidas mediante el actuador (2)



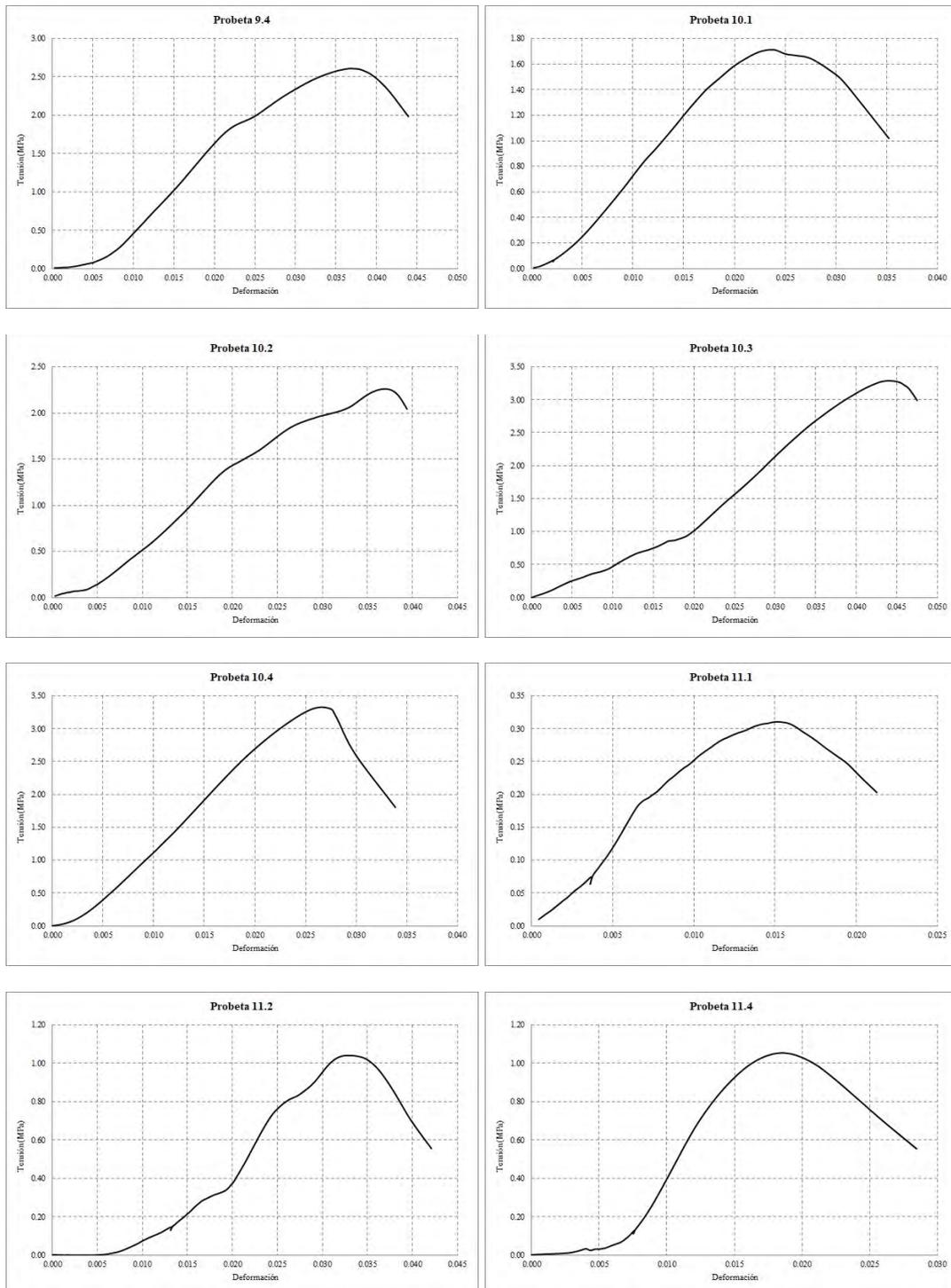
Curvas tensión-deformación de probetas cúbicas obtenidas mediante el actuador (3)



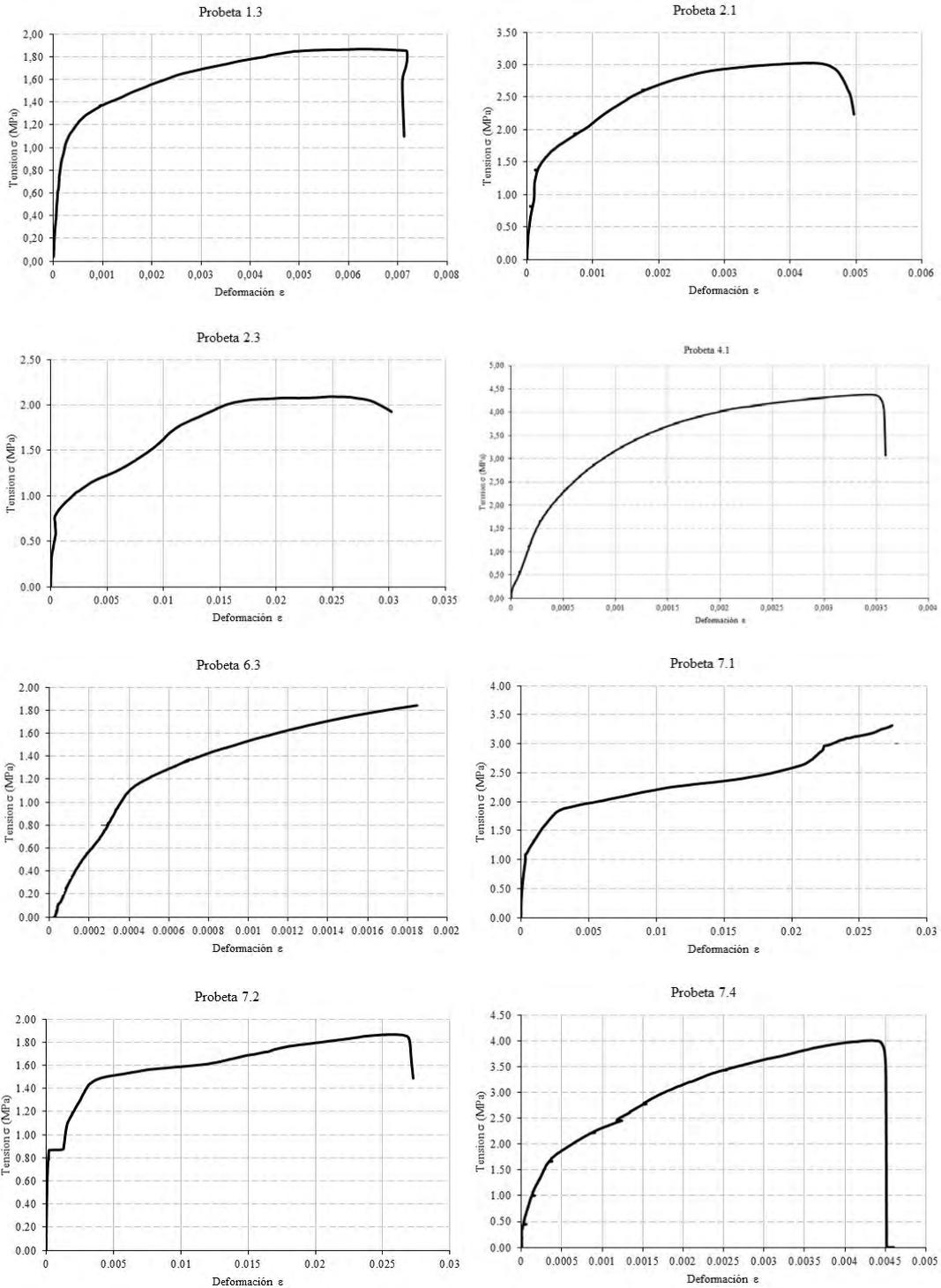
Curvas tensión-deformación de probetas cúbicas obtenidas mediante el actuador (4)



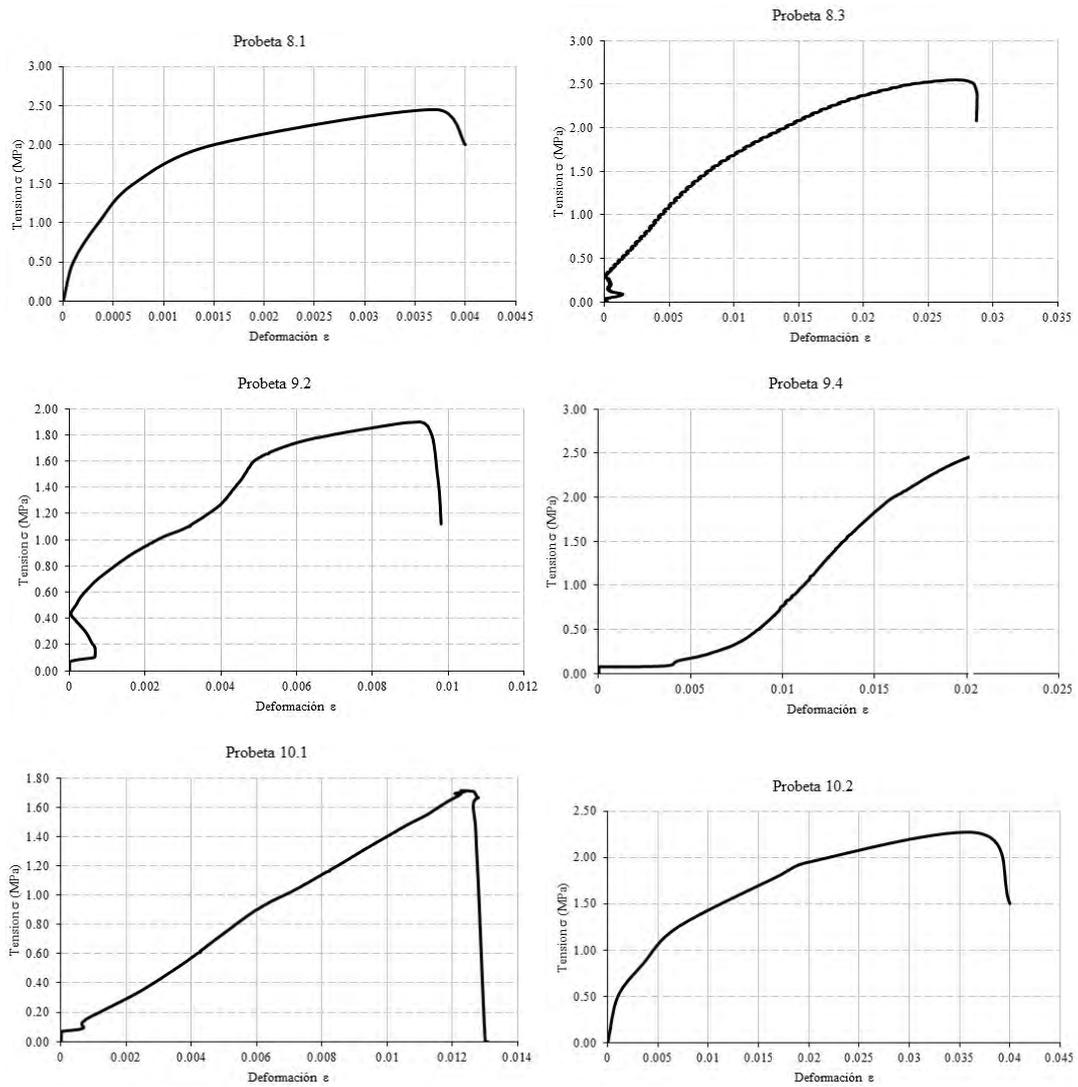
Curvas tensión-deformación de probetas cúbicas obtenidas mediante el actuador (5)



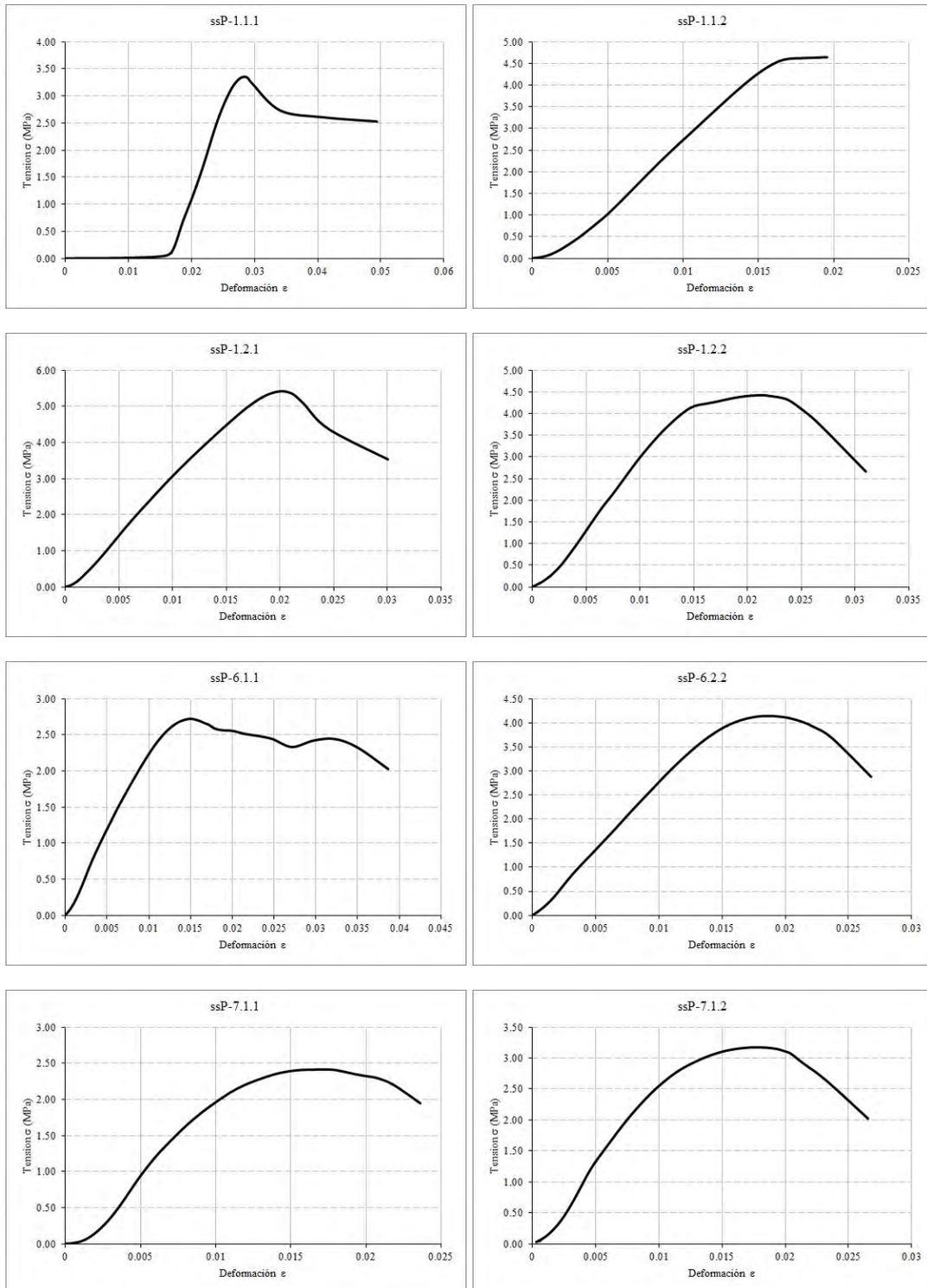
Curvas tensión-deformación de probetas cúbicas obtenidas mediante LVDT (1)



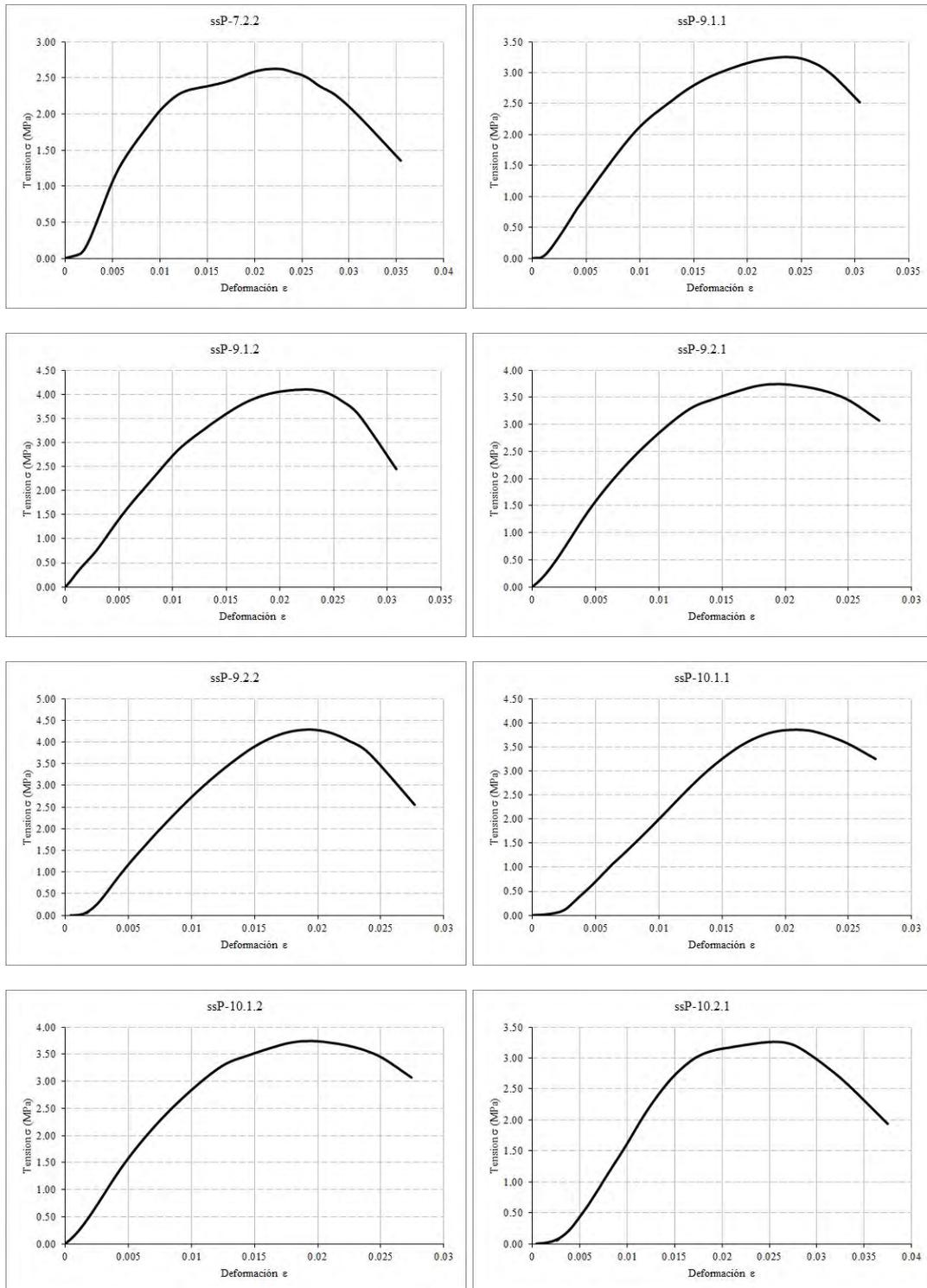
Curvas tensión-deformación de probetas cúbicas obtenidas mediante LVDT (2)



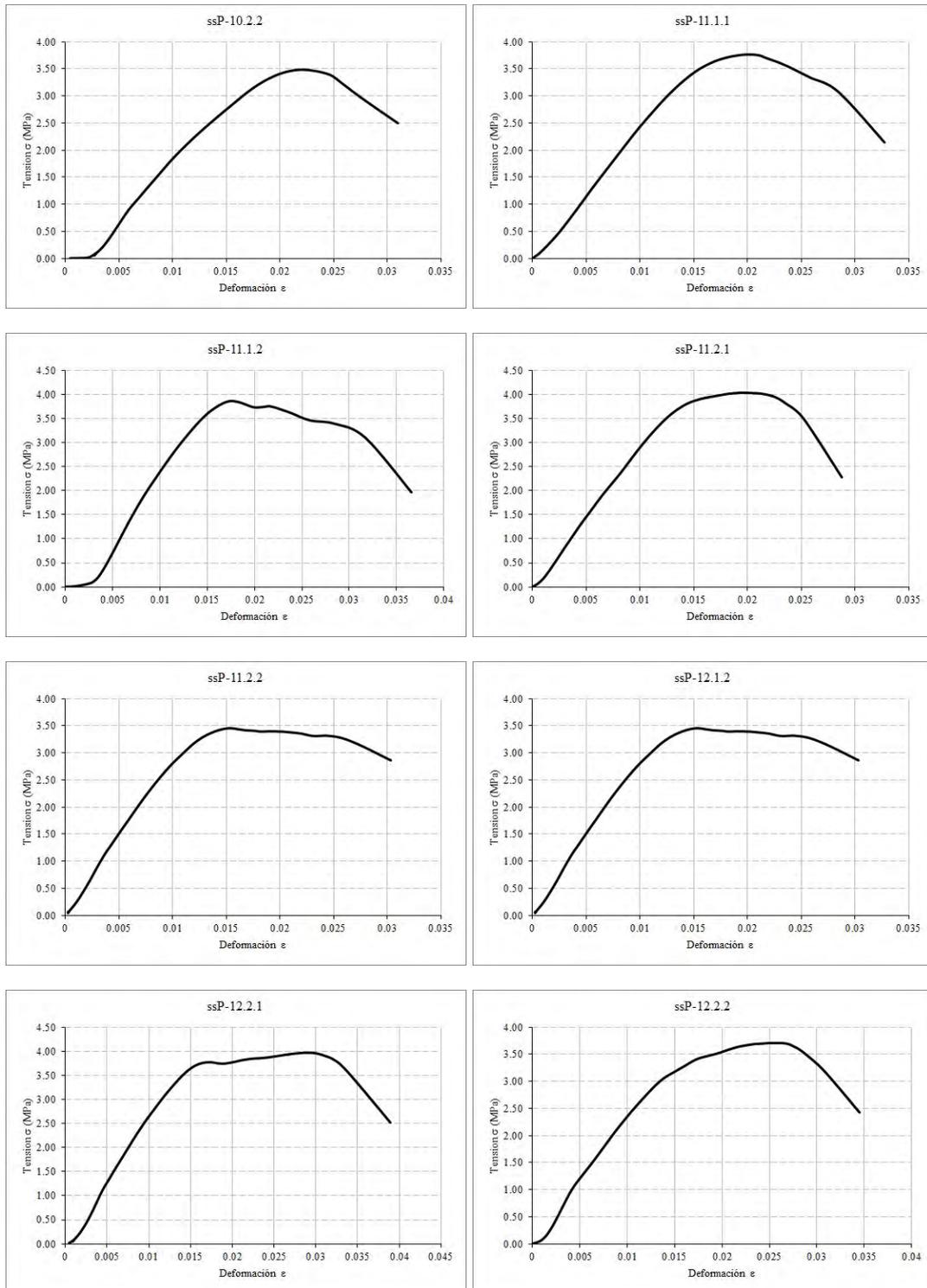
Curvas tensión-deformación de sub-probetas cúbicas obtenidas mediante el actuador (1)



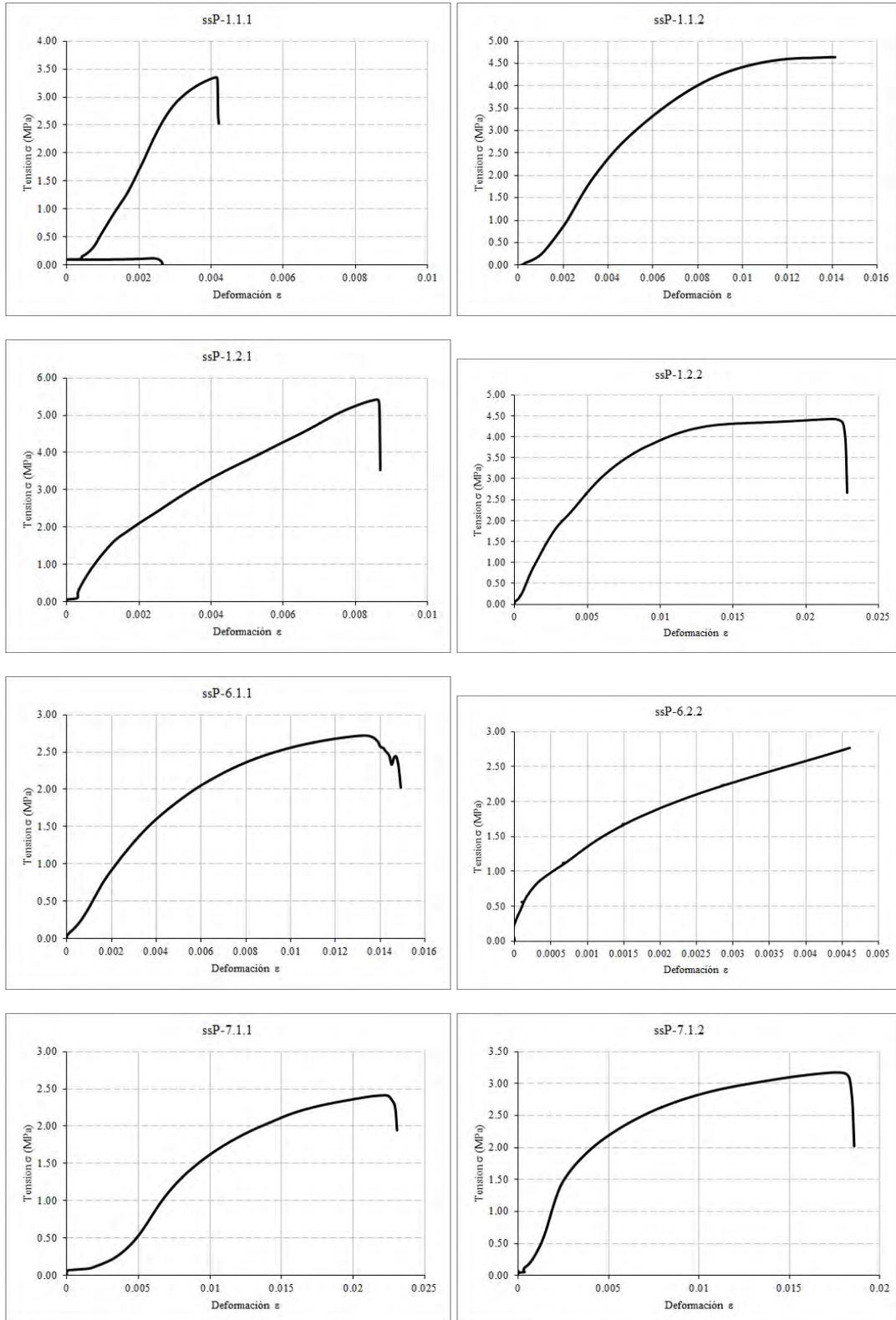
Curvas tensión-deformación de sub-probetas cúbicas obtenidas mediante el actuador (2)



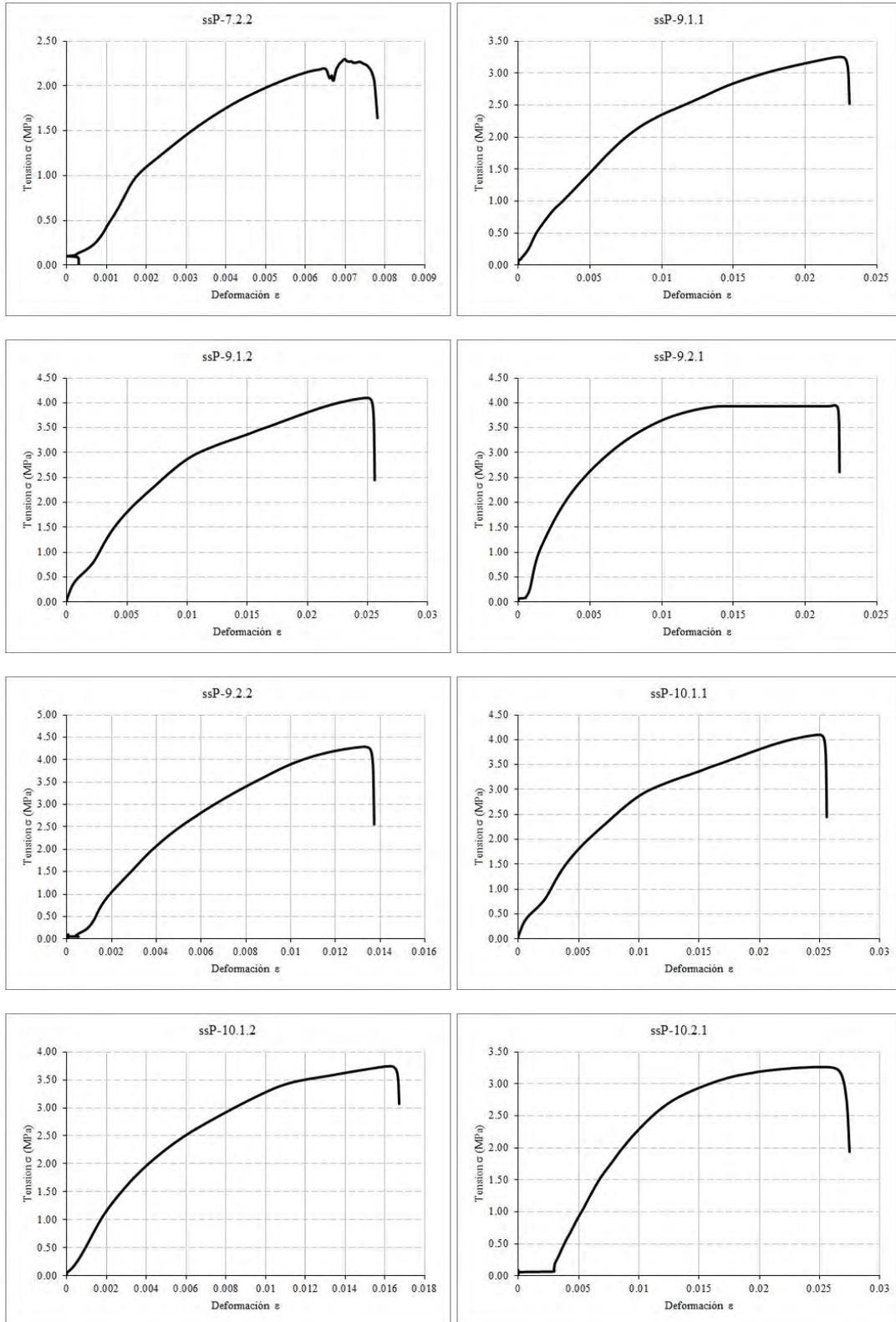
Curvas tensión-deformación de sub-probetas cúbicas obtenidas mediante el actuador (3)



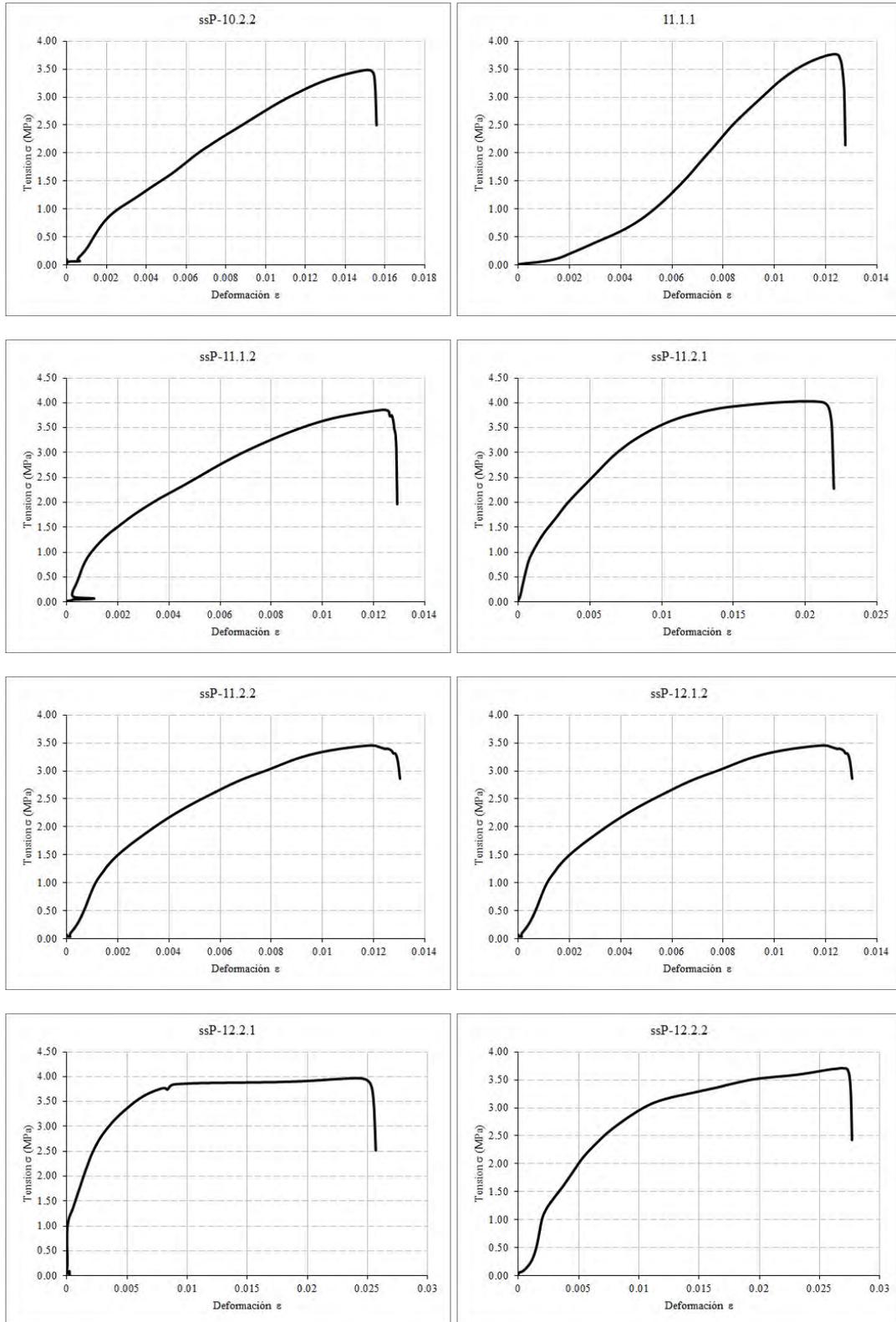
Curvas tensión-deformación de sub-probetas cúbicas obtenidas mediante LVDT (1)



Curvas tensión-deformación de sub-probetas cúbicas obtenidas mediante LVDT (2)



Curvas tensión-deformación de sub-probetas cúbicas obtenidas mediante LVDT (3)



Resumen de datos de sub-probetas cúbicas de tapial

Probeta	Ensayos de rotura						Ciclos de carga			
	f_c (Mpa)	σ	E_c (Mpa)	σ	μ	σ	$E_{c,s}$ (Mpa)	σ	μ	σ
ssP-1.1.1	3,35		1407		0,32		1943		0,23	
ssP-1.1.2	4,64		544		0,39		1314		0,22	
ssP-1.2.1	5,42		1310		-		1809		0,20	
ssP-1.2.2	4,42		1266		0,40		1566		0,20	
media	4,46	19,35%	1132	39,29%	0,37	17,73%	1658	-5,05%	0,21	-11,94%
ssP-6.1.1	2,72		547		0,37		1195		0,31	
ssP-6.2.1	3,74		567		-		2623		0,33	
ssP-6.2.2	4,14		570		0,29		1972		0,25	
media	3,53	-5,39%	561	-30,92%	0,33	5,00%	1766	1,10%	0,28	-16,03%
ssP-7.1.1	2,41		191		0,26		1314		0,23	
ssP-7.1.2	3,17		546		0,36		1546		-	
ssP-7.2.1	2,63		-		-		1577		0,35	
ssP-7.2.2	2,30		459		0,37		1848		0,19	
media	2,63	-29,65%	399	-50,94%	0,33	5,00%	1571	-10,02%	0,26	6,36%
ssP-9.1.1	3,25		398		0,33		2224		0,15	
ssP-9.1.2	4,10		370		0,20		1502		0,23	
ssP-9.2.1	3,95		694		0,31		2074		0,25	
ssP-9.2.2	4,29		520		0,19		1557		0,25	
media	3,90	4,36%	661	-18,69%	0,26	-18,07%	1839	5,33%	0,22	-8,83%
ssP-10.1.1	3,85		-		-		1790		0,21	
ssP-10.1.2	3,74		586		0,16		1980		0,32	
ssP-10.2.1	3,26		236		-		1235		0,22	
ssP-10.2.2	3,48		381		0,27		1443		0,24	
media	3,58	-4,08%	401	-50,65%	0,22	-31,59%	1612	-7,70%	0,25	2,57%
ssP-11.1.1	3,77		277		0,34		2206		0,35	
ssP-11.1.2	3,86		1069		0,36		1968		-	
ssP-11.2.1	4,03		1168		0,34		1649		0,21	
ssP-11.2.2	3,45		1028		0,32		2043		0,28	
media	3,78	1,14%	1181	45,31%	0,34	8,18%	1967	12,62%	0,28	-16,03%
ssP-12.1.1	4,84		1028		0,41		1970		0,12	
ssP-12.1.2	4,55		1115		0,35		1834		0,26	
ssP-12.2.1	3,97		1405		0,32		1834		0,19	
ssP-12.2.2	3,71		513		0,35		1607		0,20	
media	4,27	14,26%	1354	66,60%	0,36	13,75%	1811	3,72%	0,19	-20,23%

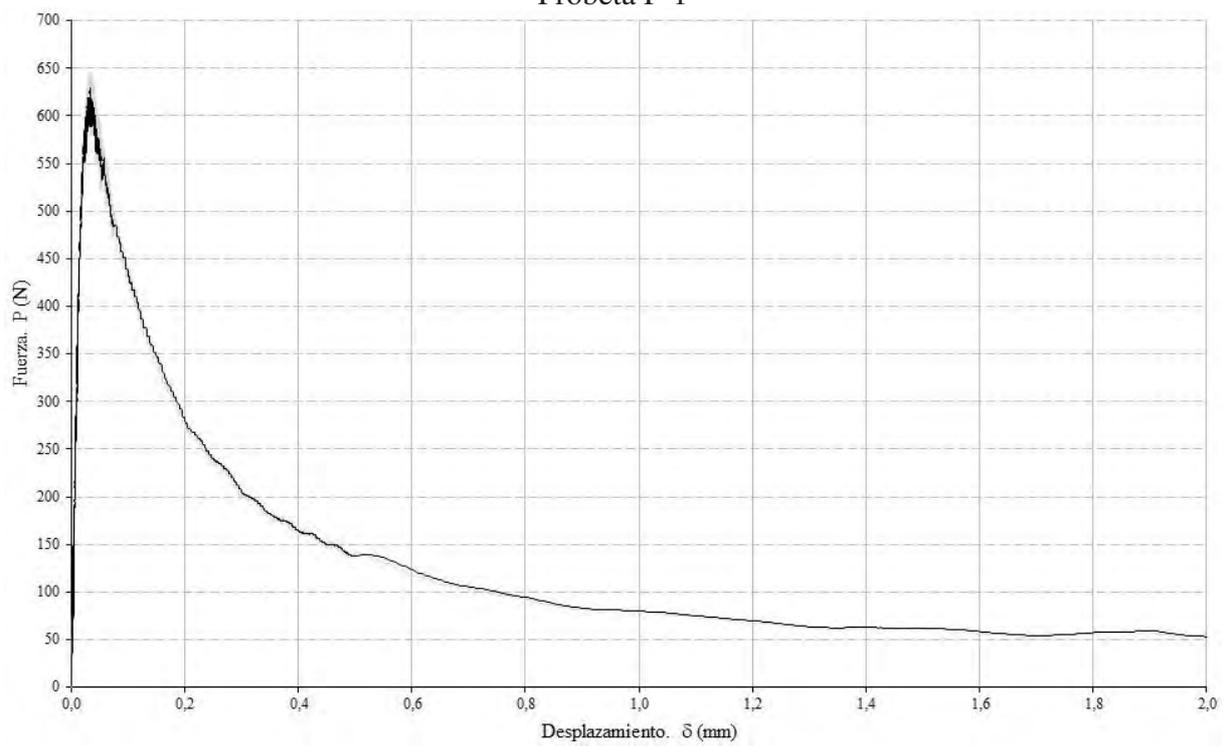
Resumen de datos de probetas cúbicas de tapial

Probeta	Ensayos de rotura						Probeta	Ensayos de rotura					
	f_c (Mpa)	σ	E_c (Mpa)	σ	μ	σ		f_c (Mpa)	σ	E_c (Mpa)	σ	μ	σ
1.1	2,26		3919		0,36		7.1	3,44		1259		0,62	
1.2	1,96		-		-		7.2	1,87		6615		-	
1.3	1,87		6188		0,30		7.3	1,88		-		-	
1.4	-		-		-		7.4	4,01		5125		0,24	
media serie 1	2,03	-20,33%	5054	95,03%	0,33	4,49%	media serie 7	2,80	9,96%	4333	67,23%	0,43	36,15%
2.1	3,03		1039		0,35		8.1	2,45		2857		0,42	
2.2	-		-		-		8.2	2,69		2180		0,35	
2.3	2,09		2190		0,38		8.3	2,55		2230		0,29	
2.4	2,29		-		-		8.4	2,76		1547		0,37	
media serie 2	2,47	-3,00%	1076	-58,46%	0,37	15,57%	media serie 8	2,61	2,59%	2204	-14,96%	0,36	13,19%
3.1	2,96		-		-		9.1	1,84		-		-	
3.2	-		-		-		9.2	1,90		751		-	
3.3	2,46		-		-		9.3	2,04		79		-	
3.4	2,00		-		-		9.4	2,61		91		0,12	
media serie 3	2,47	-2,87%	-	-	-	-	media serie 9	2,10	-17,63%	307	-88,15%	0,12	-62,01%
4.1	4,38		5676		-		10.1	1,71		147		0,23	
4.2	2,45		-		-		10.2	2,26		115		0,22	
4.3	2,16		4500		0,26		10.3	3,29		132		0,14	
4.4	2,58		2236		0,50		10.4	3,33		141		0,19	
media serie 4	2,89	13,59%	4137	59,67%	0,38	20,32%	media serie 10	2,65	3,97%	178	-93,12%	0,20	-38,26%
5.1	2,59		2189		-		11.1	0,31		82		0,51	
5.2	2,89		5470		0,31		11.2	1,05		52		-	
5.3	2,35		4609		0,36		11.3	0,84		58		0,50	
5.4	2,22		2008		-		11.4	1,05		130		0,26	
media serie 5	2,51	-1,33%	3569	37,74%	0,34	6,07%	media serie 11	0,81		80		0,42	
6.1	3,48		-		-								
6.2	3,40		-		-								
6.3	2,79		2462		0,33								
6.4	2,05		-		-								
media serie 6	2,93	15,06%	2462	-4,98%	0,33	4,49%							

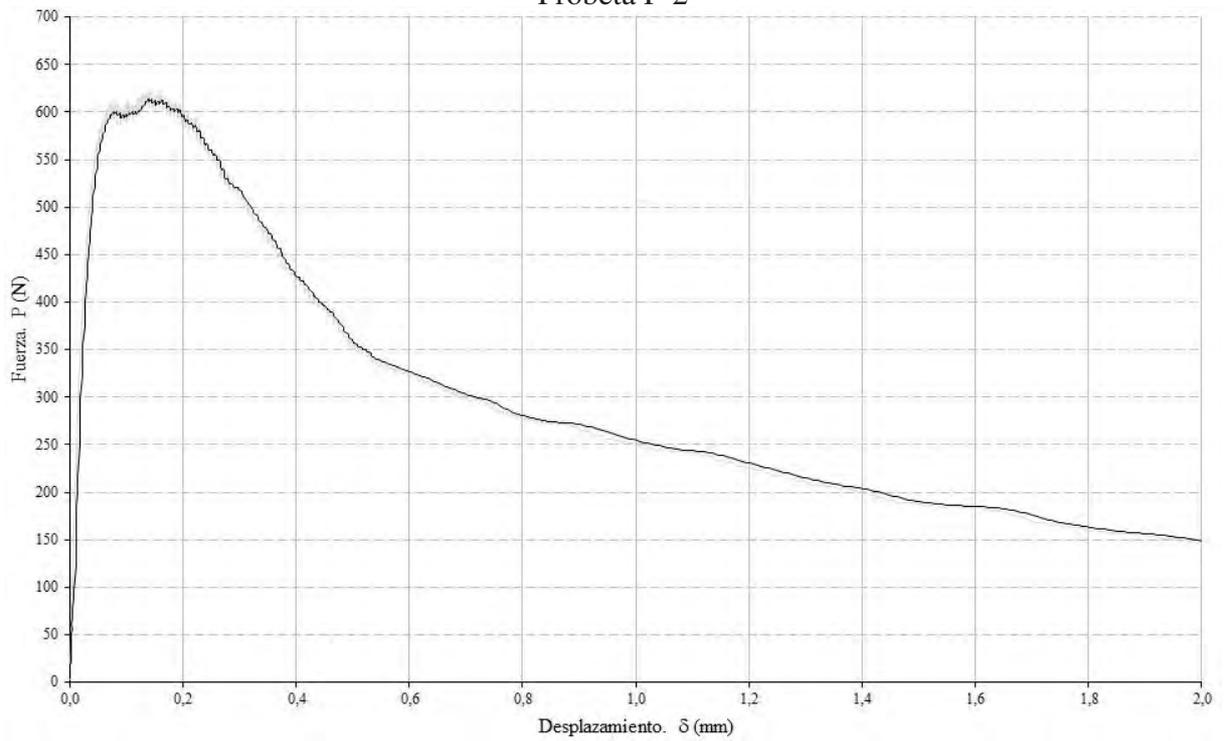
Apéndice B

Curvas P- δ en ensayos 3PBT sobre probetas de tapial

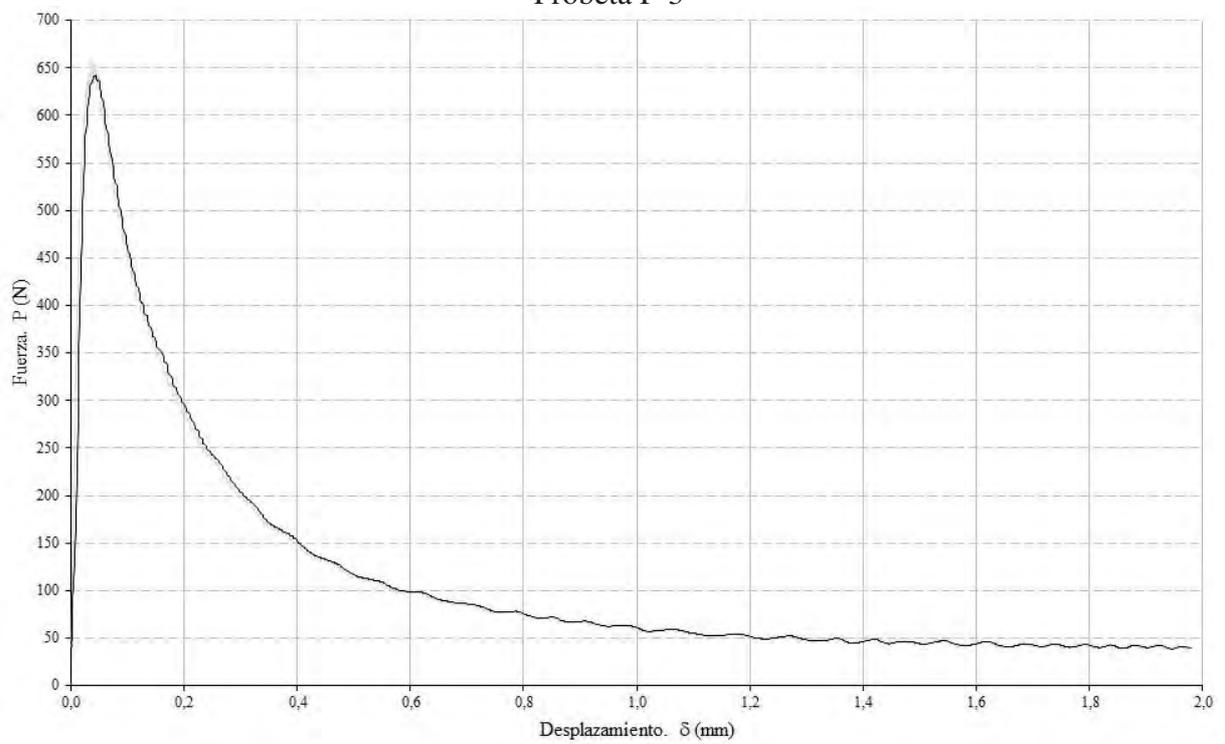
Probeta P-1



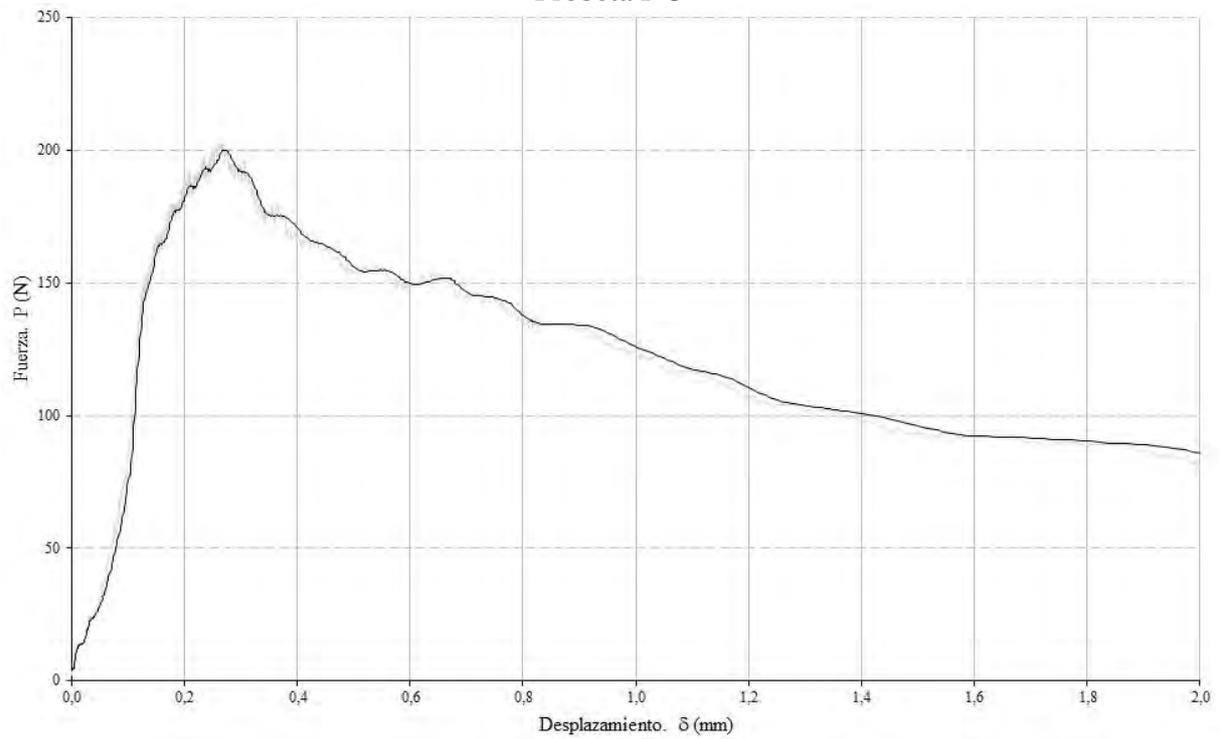
Probeta P-2



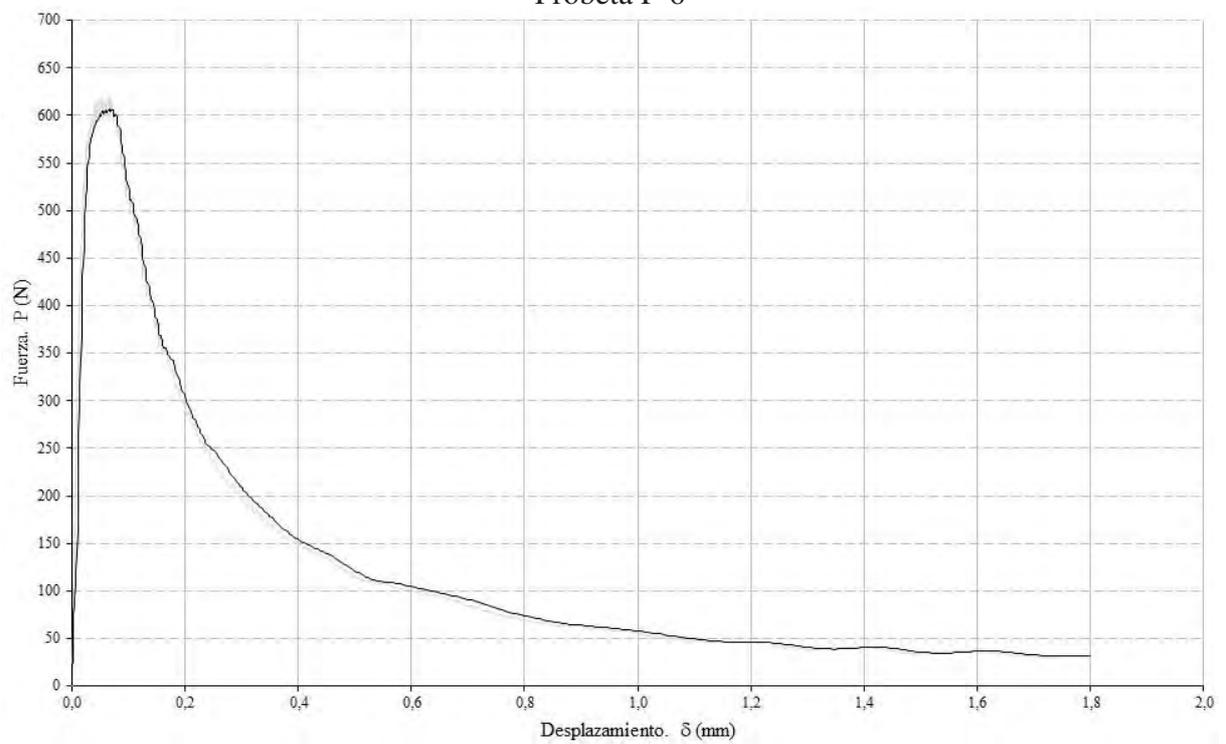
Probeta P-3



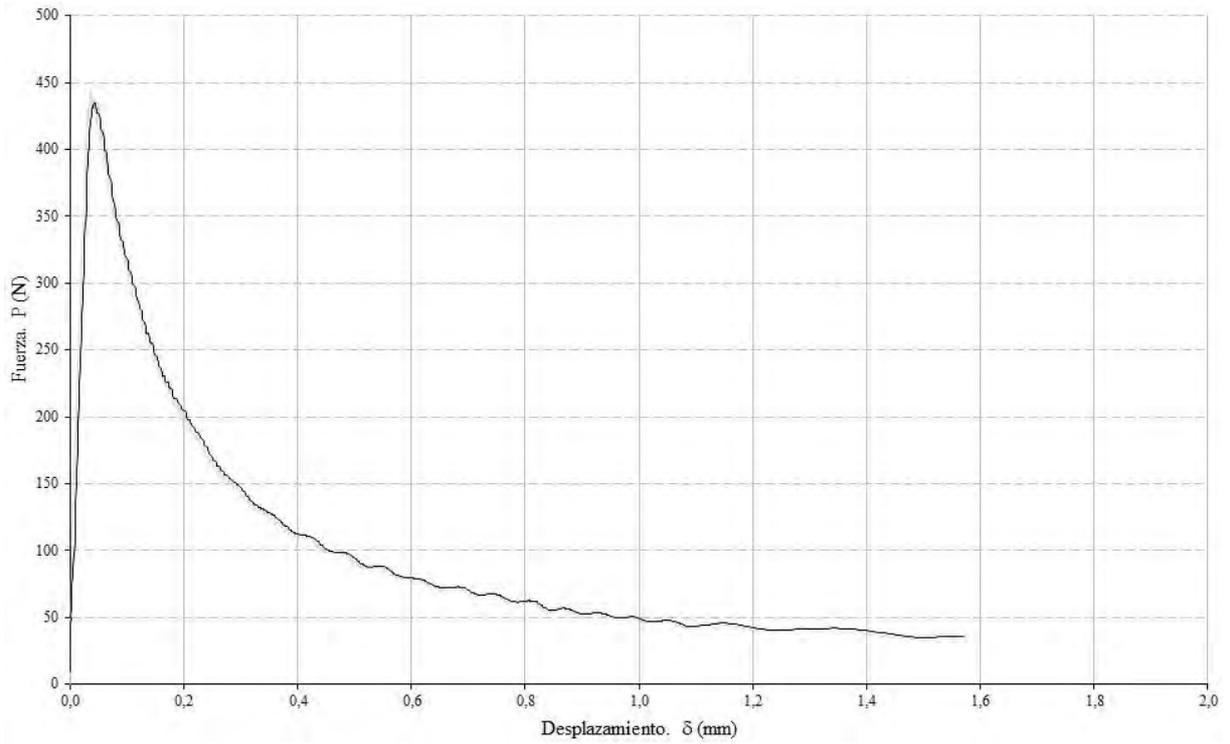
Probeta P-5



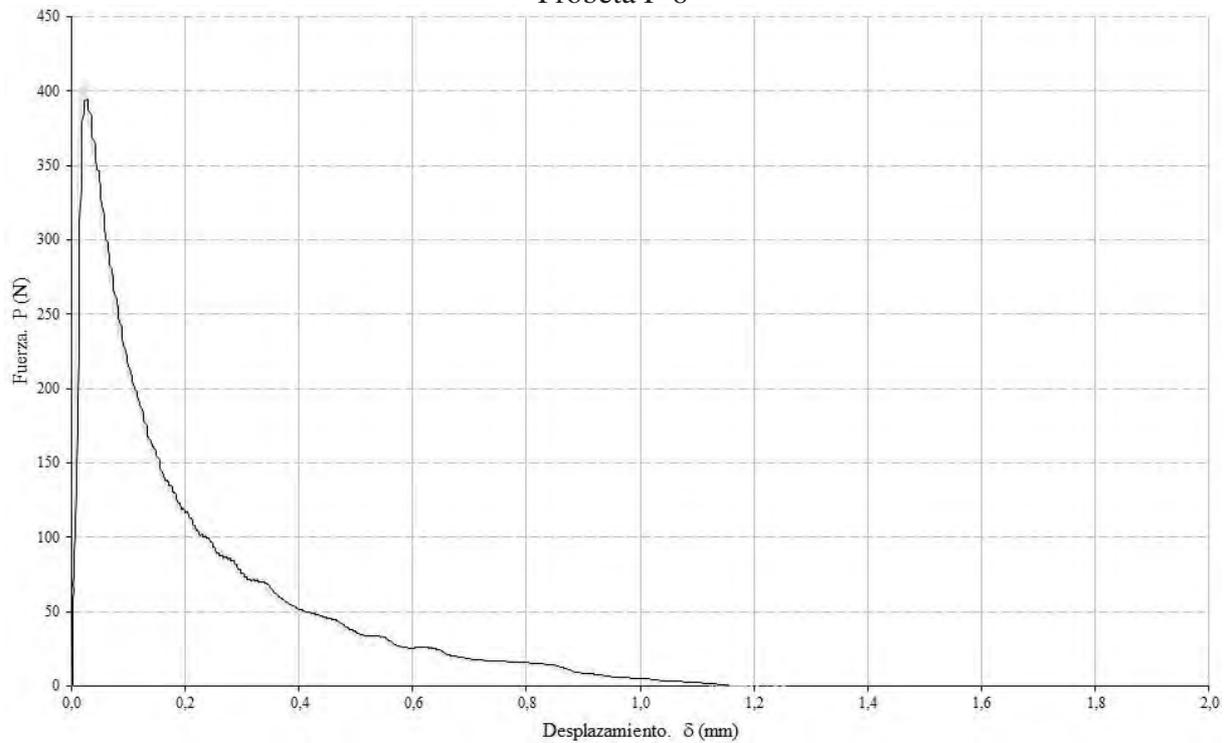
Probeta P-6



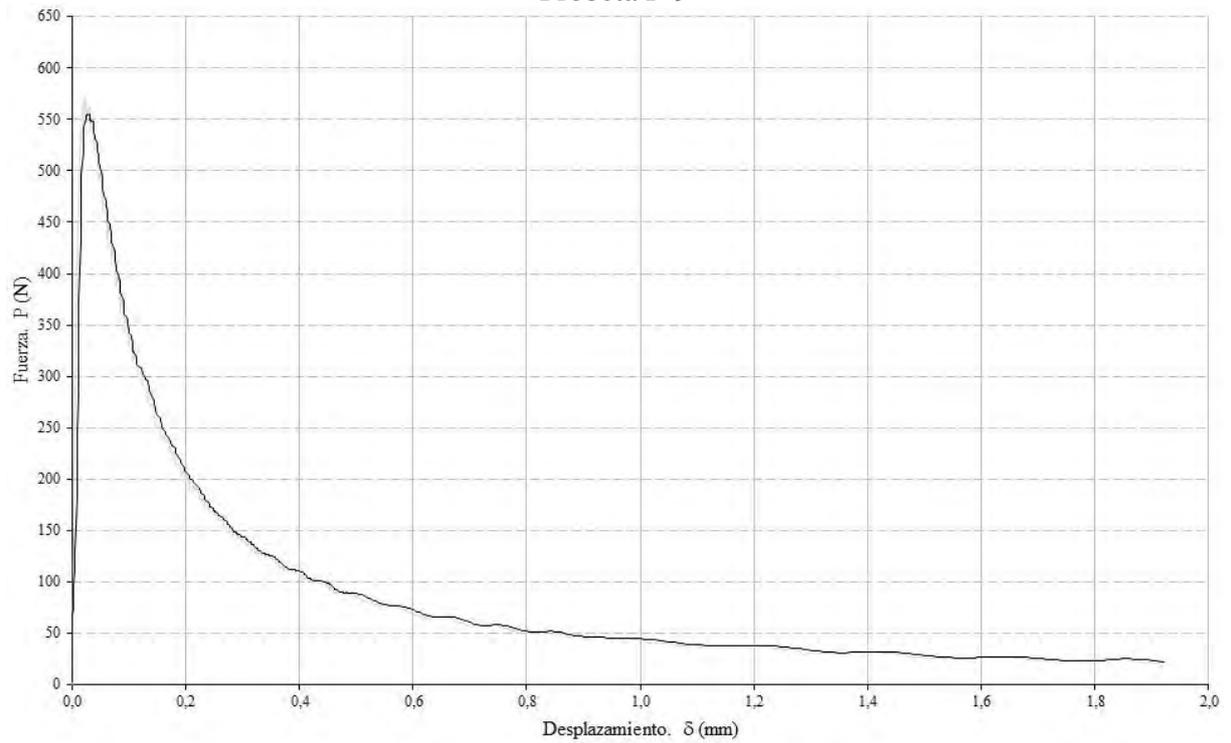
Probeta P-7



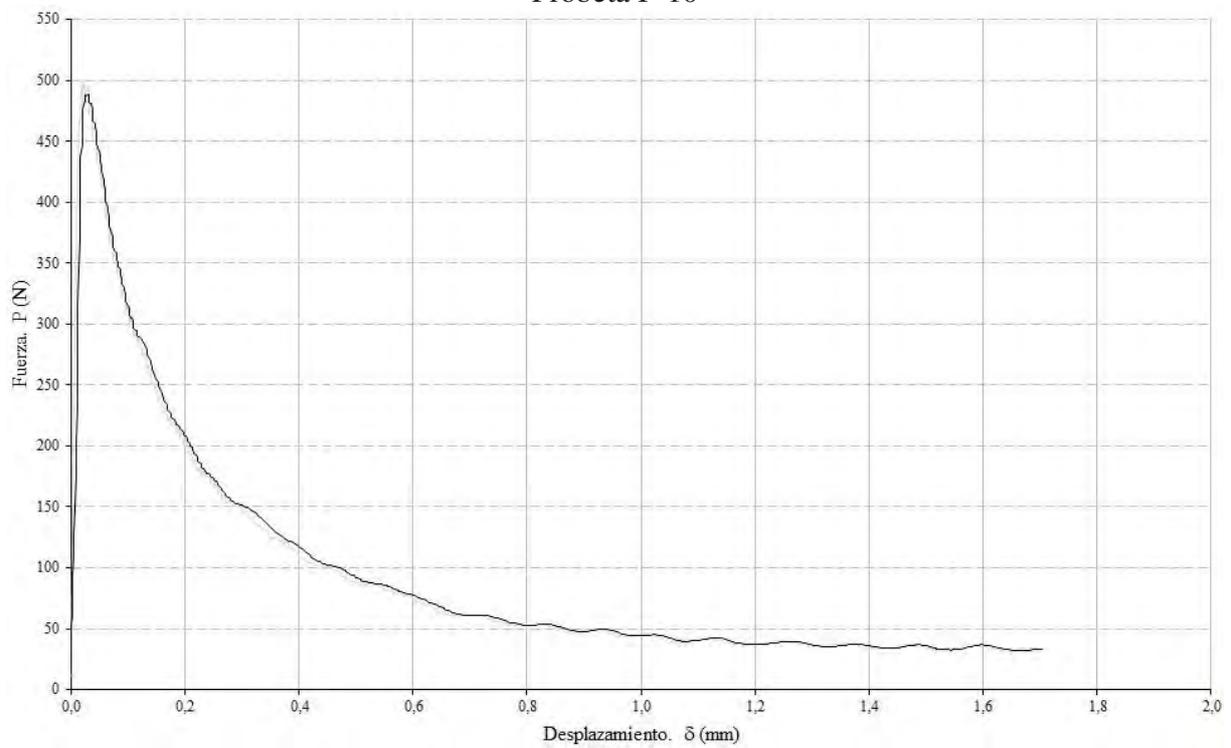
Probeta P-8



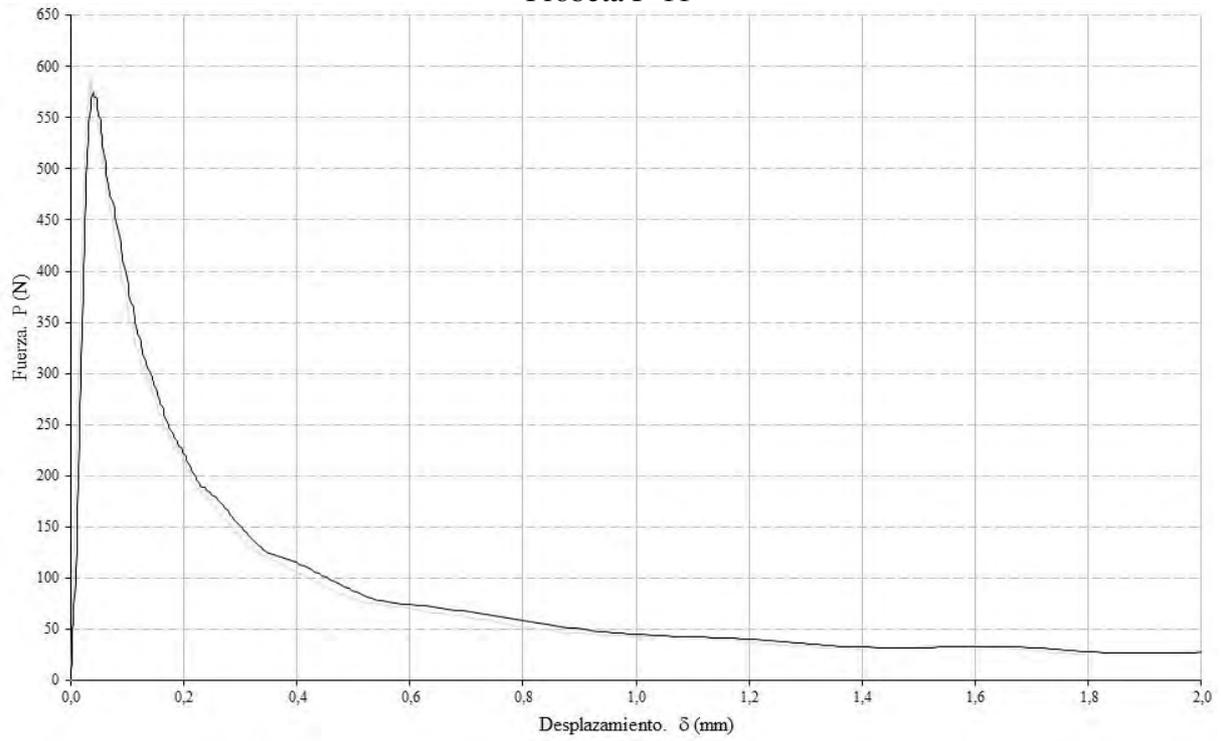
Probeta P-9



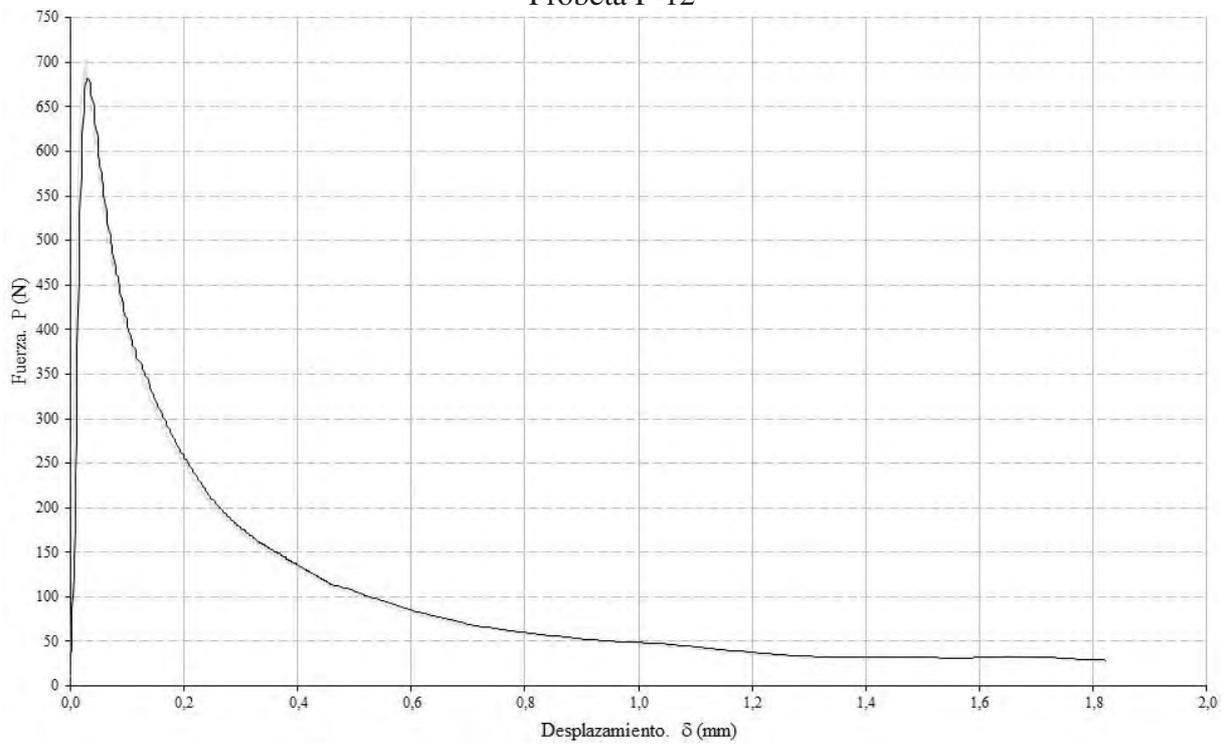
Probeta P-10



Probeta P-11

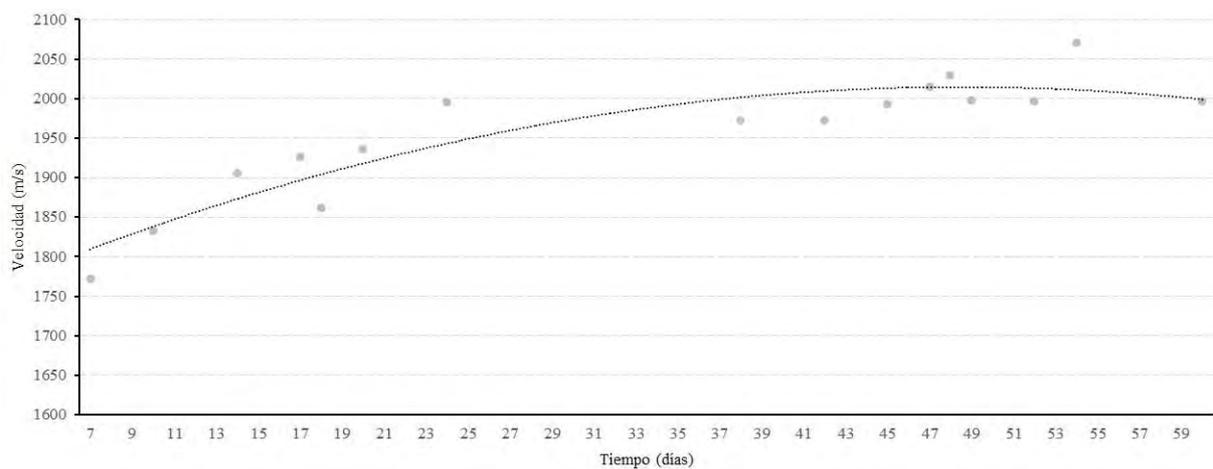


Probeta P-12

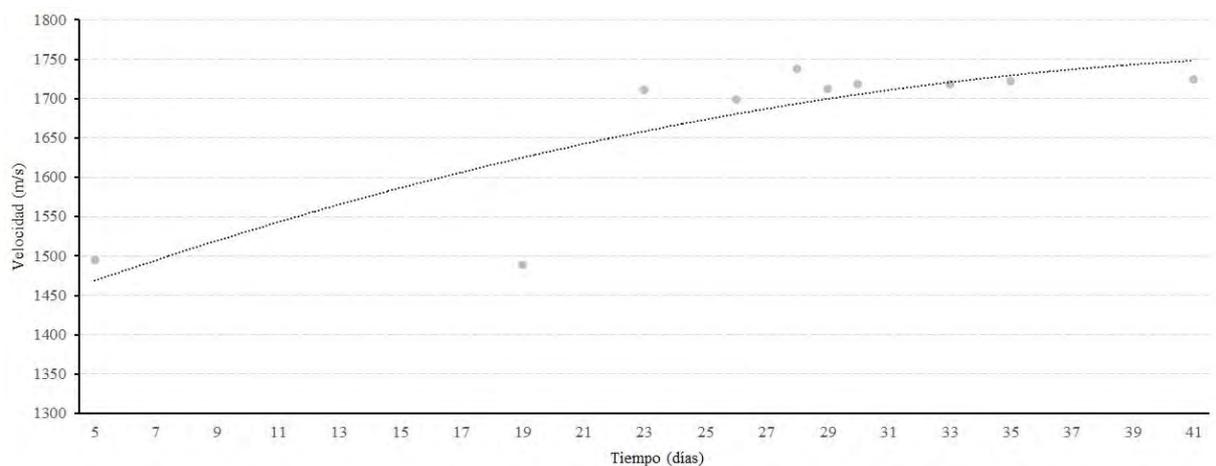


Apéndice C

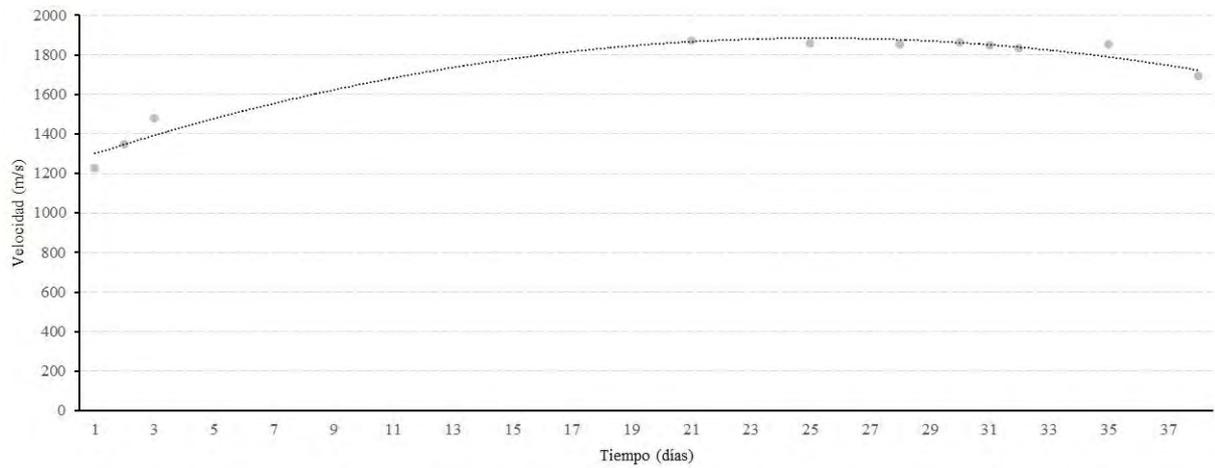
Evolución temporal de UPV en probetas prismáticas



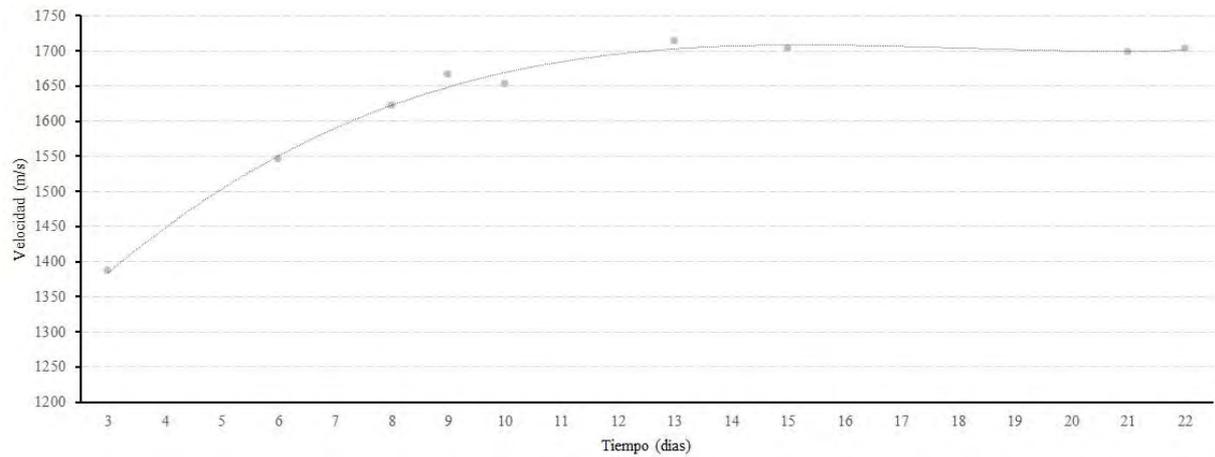
Variación temporal de UPV en probeta 1. Dosificación 3:1



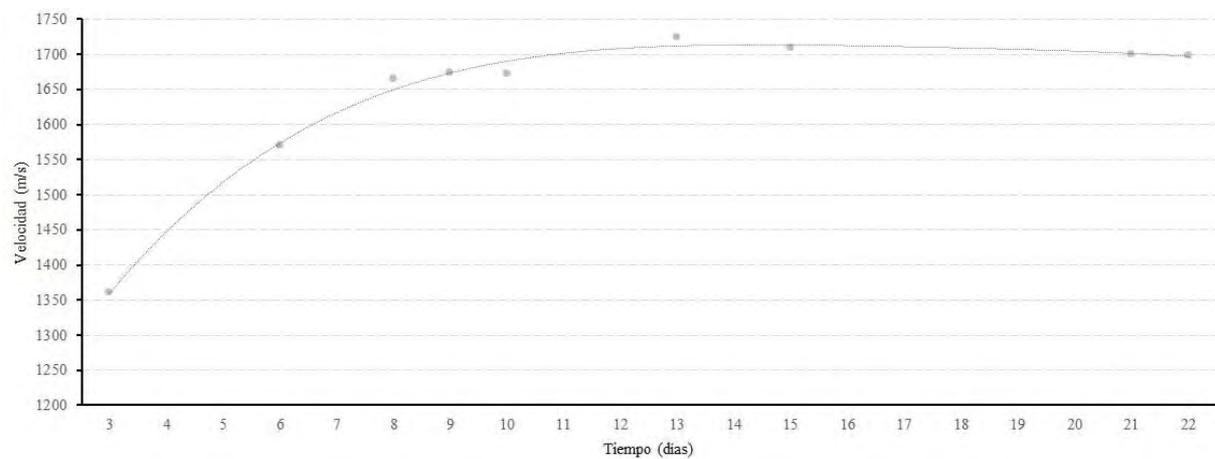
Variación temporal de UPV en probeta 2. Dosificación 3:1



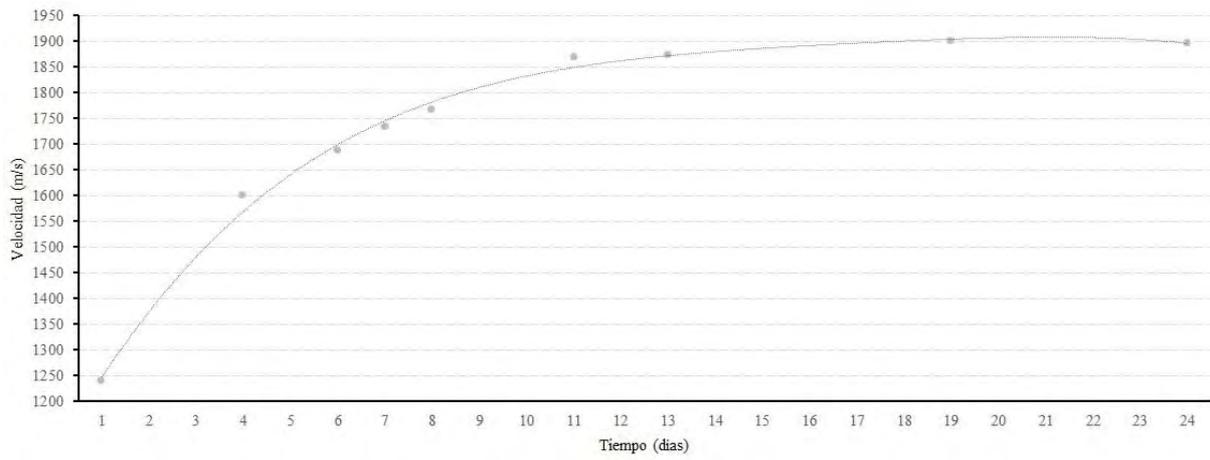
Variación temporal de UPV en probeta 3. Dosificación 3:1



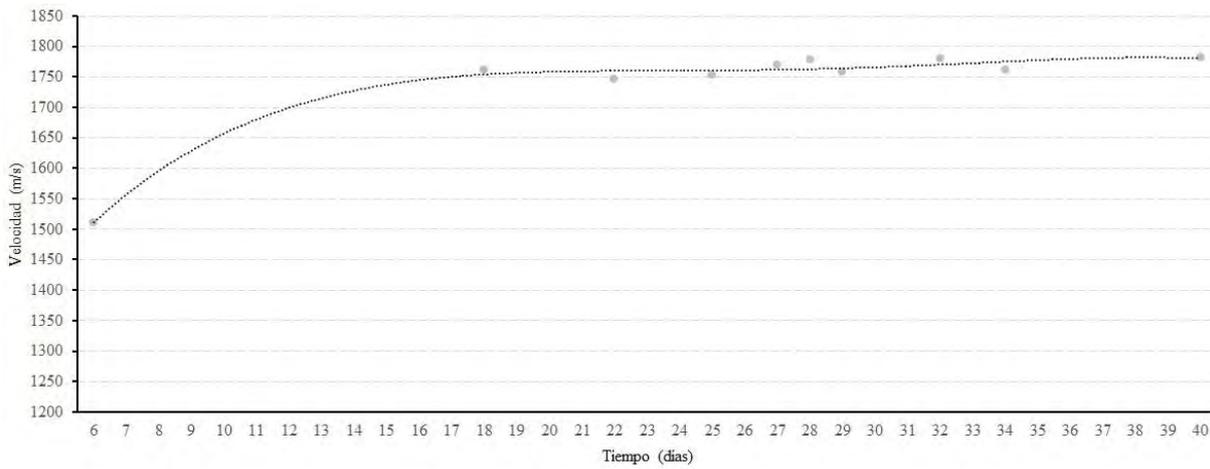
Variación temporal de UPV en probeta 4. Dosificación 3:1



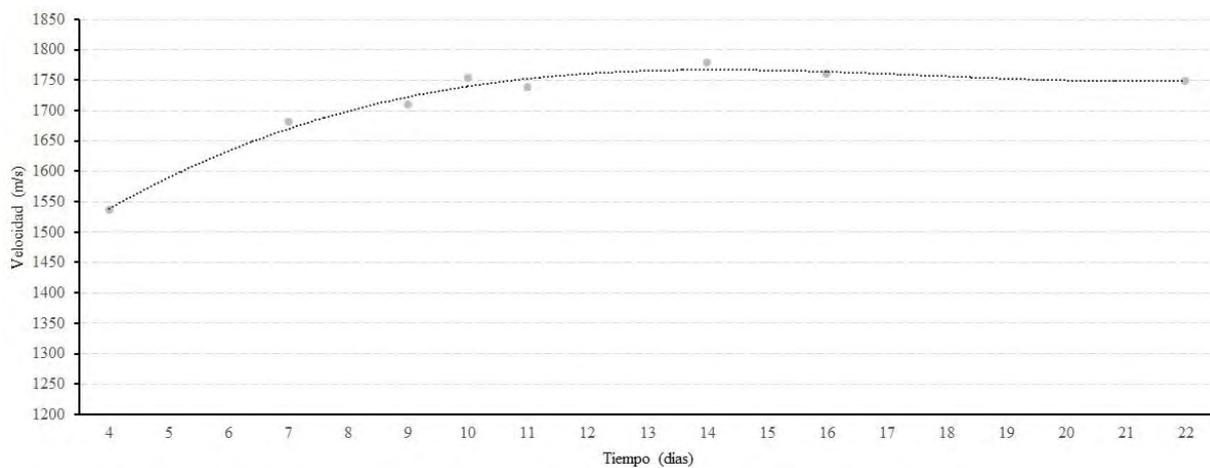
Variación temporal de UPV en probeta 5. Dosificación 3:1



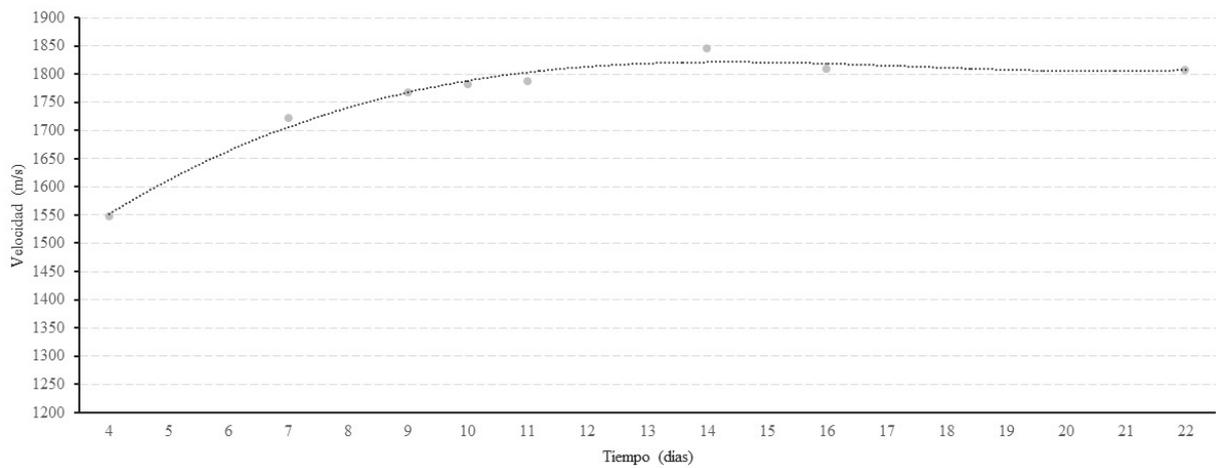
Variación temporal de UPV en probeta 6. Dosificación 3:1



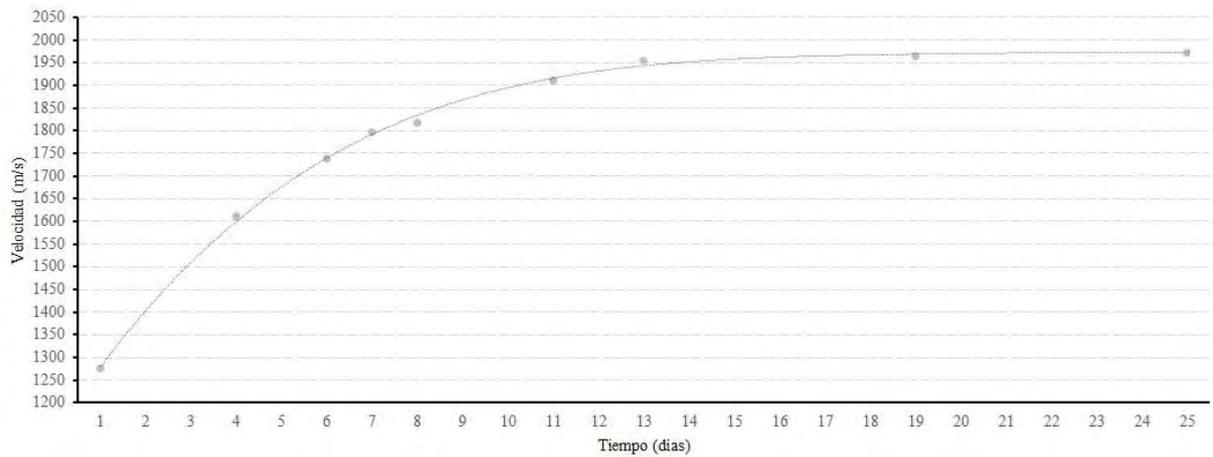
Variación temporal de UPV en probeta 7. Dosificación 4:1



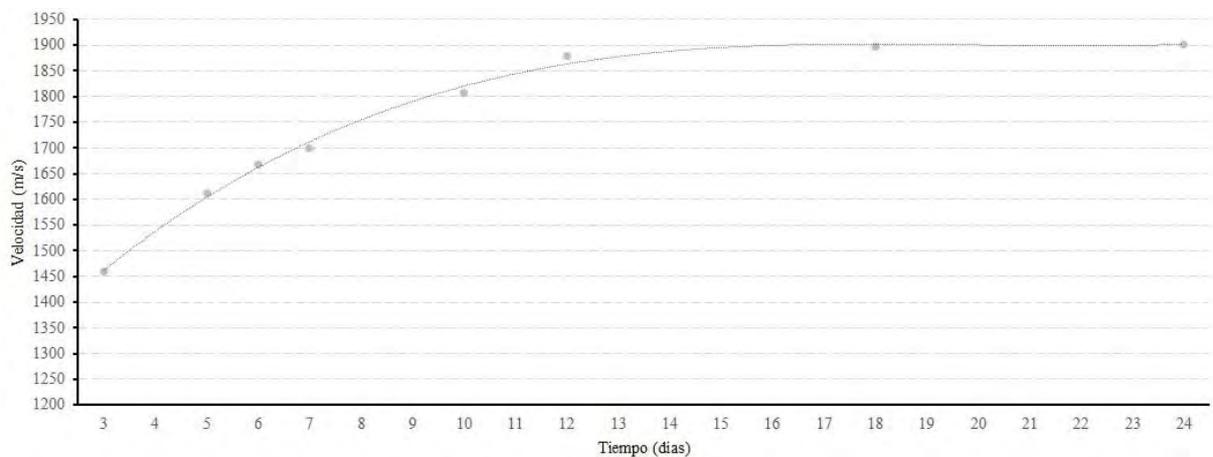
Variación temporal de UPV en probeta 8. Dosificación 4:1



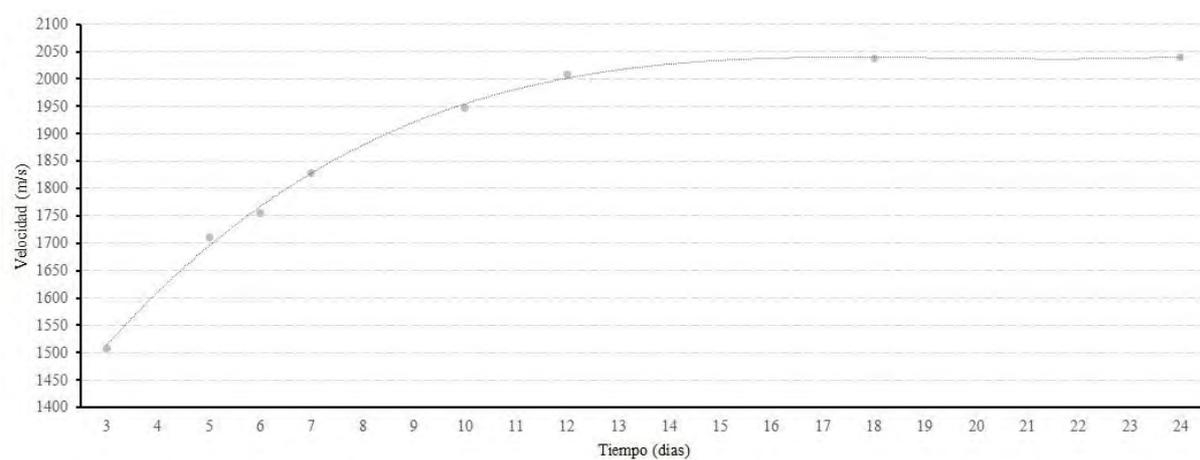
Variación temporal de UPV en probeta 9. Dosificación 4:1



Variación temporal de UPV en probeta 10. Dosificación 4:1



Variación temporal de UPV en probeta 11. Dosificación 4:1

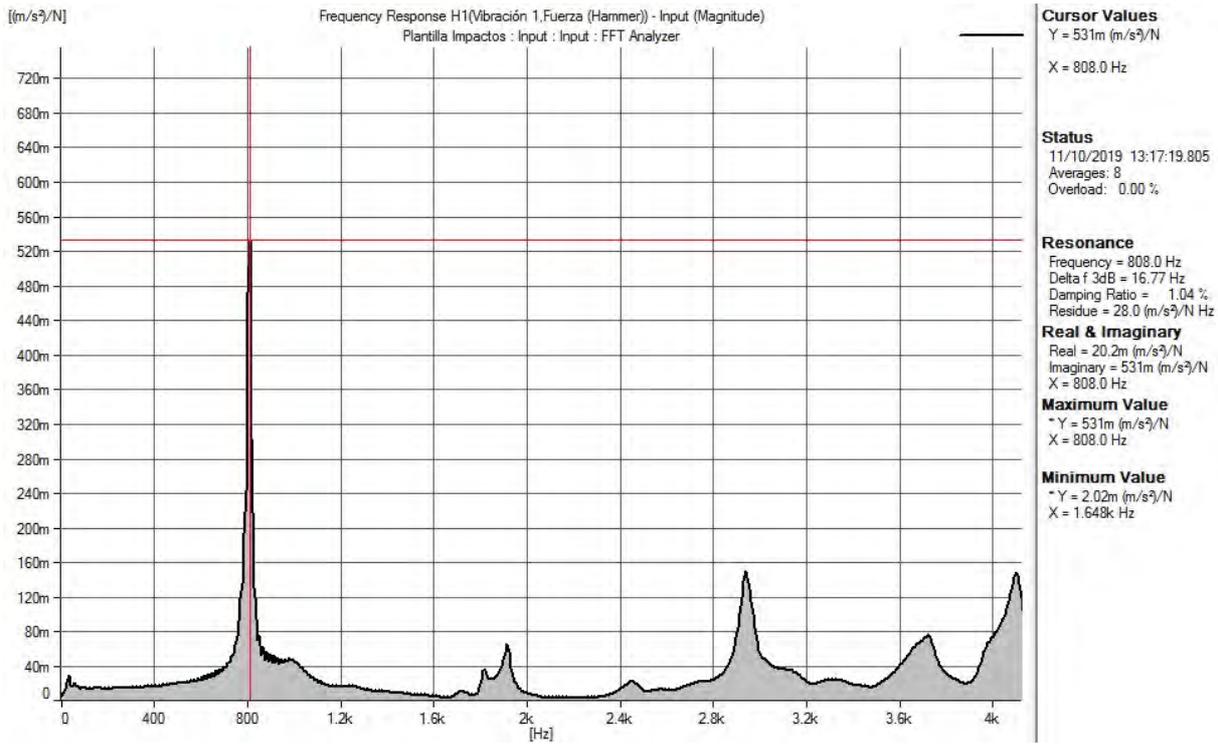
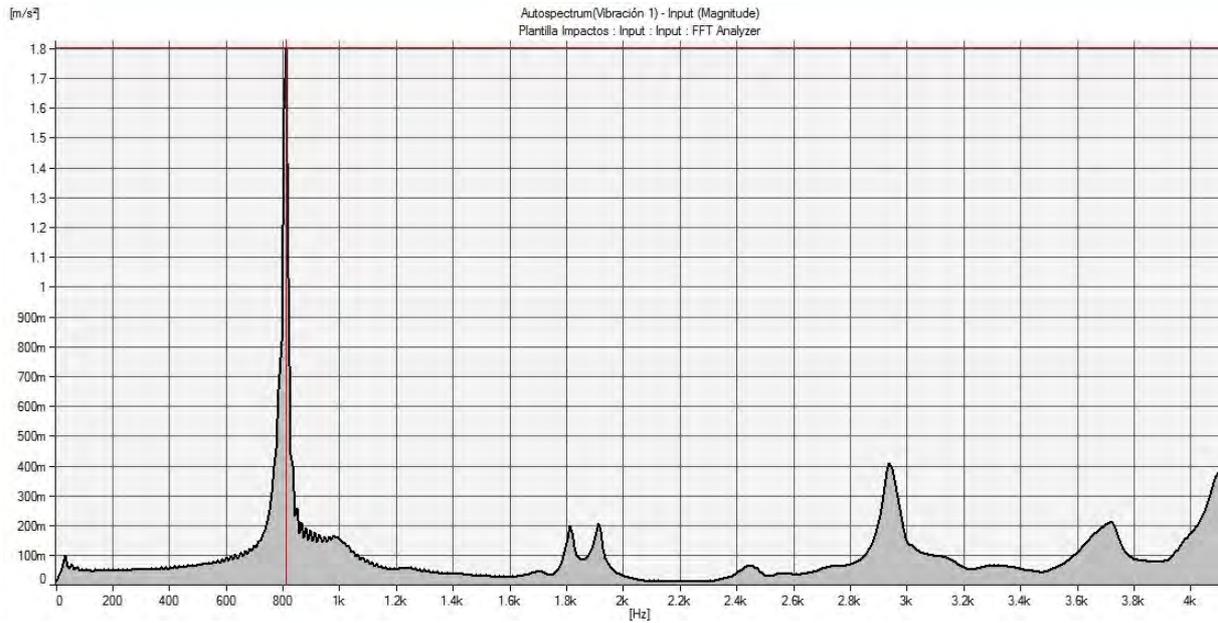


Variación temporal de UPV en probeta 12. Dosificación 4:1

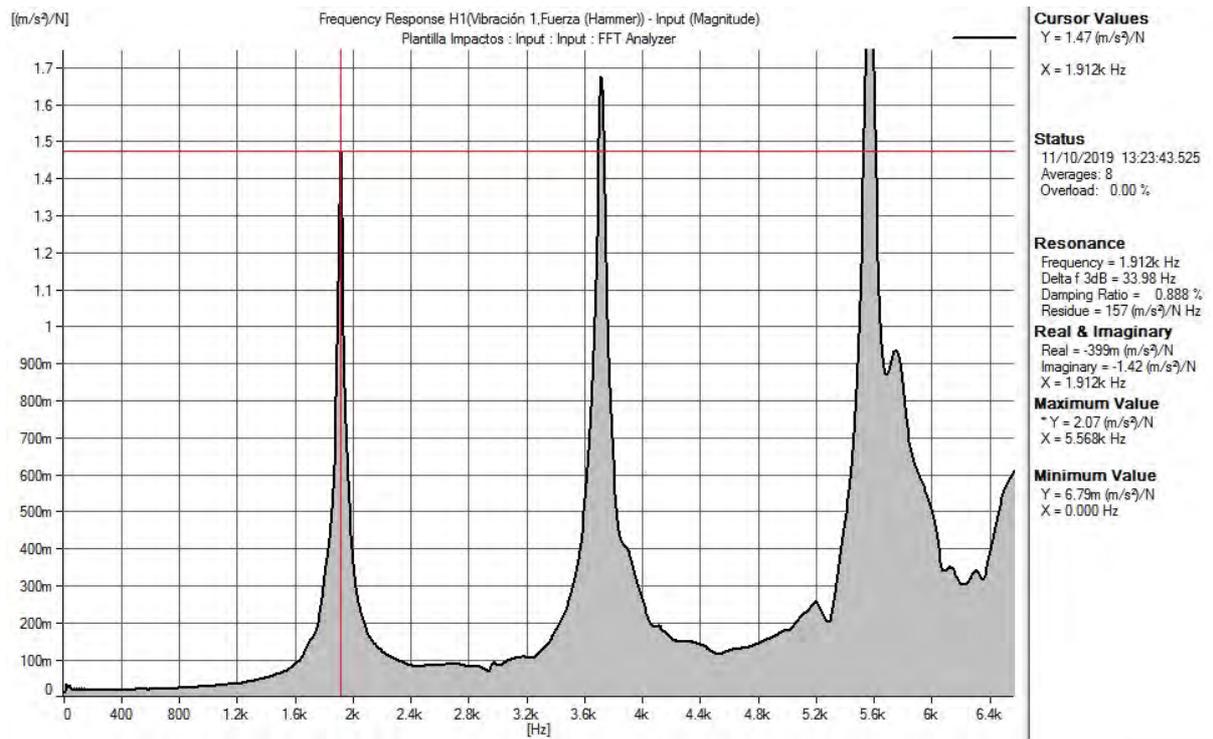
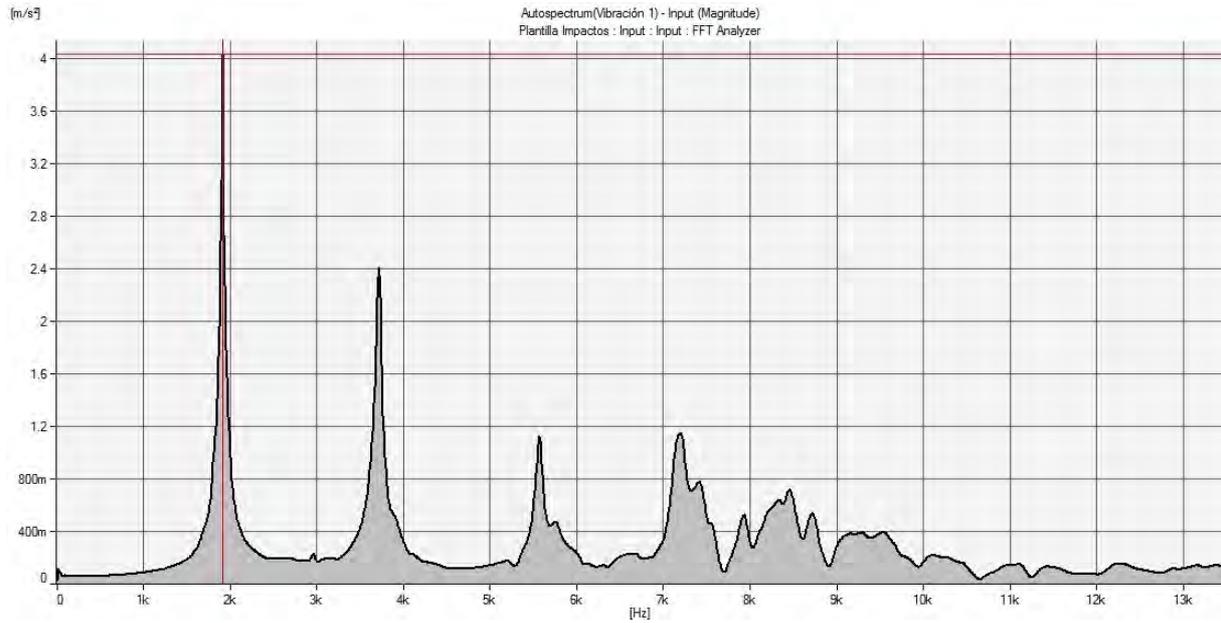
Apéndice D

Resultados de ensayos FFRF sobre probetas prismáticas

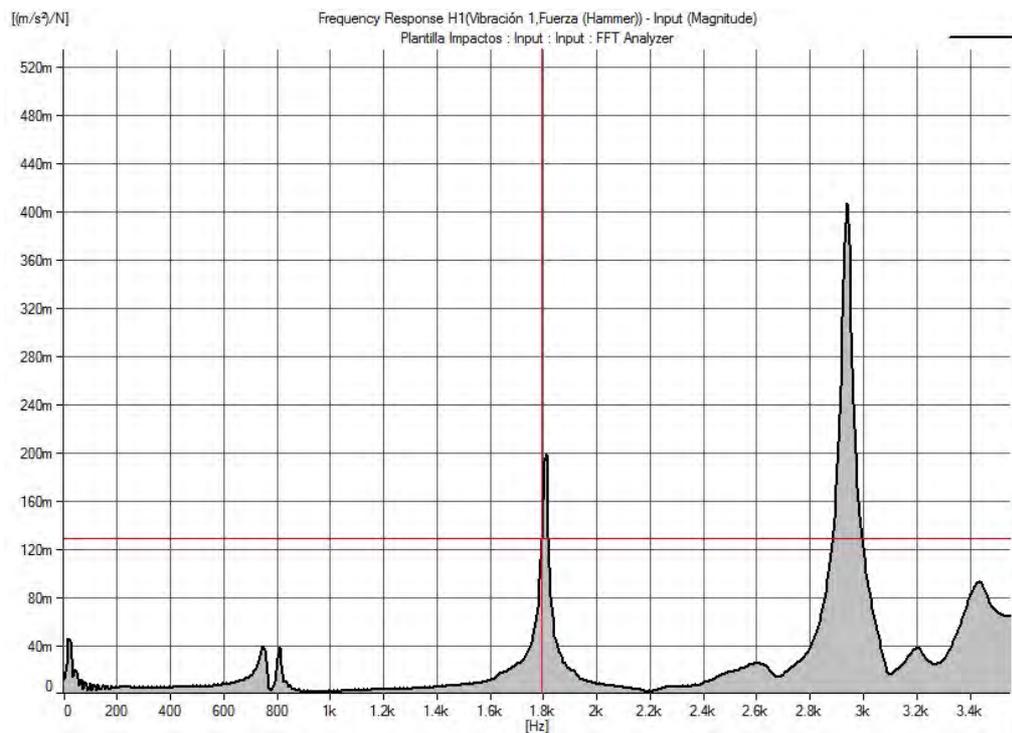
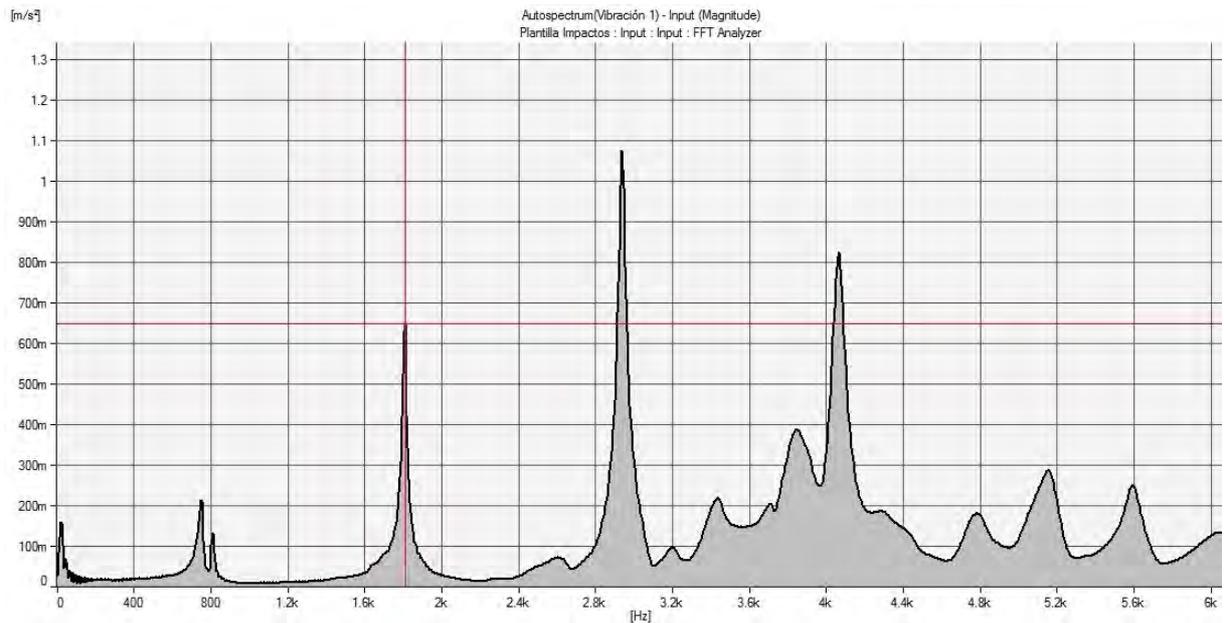
Probeta 2. Modo transversal



Probeta 2. Modo longitudinal



Probeta 2. Modo torsional



Cursor Values
Y = 128m (m/s²)/N
X = 1.792k Hz

Status
11/10/2019 13:32:58.974
Averages: 8
Overload: 0.00 %

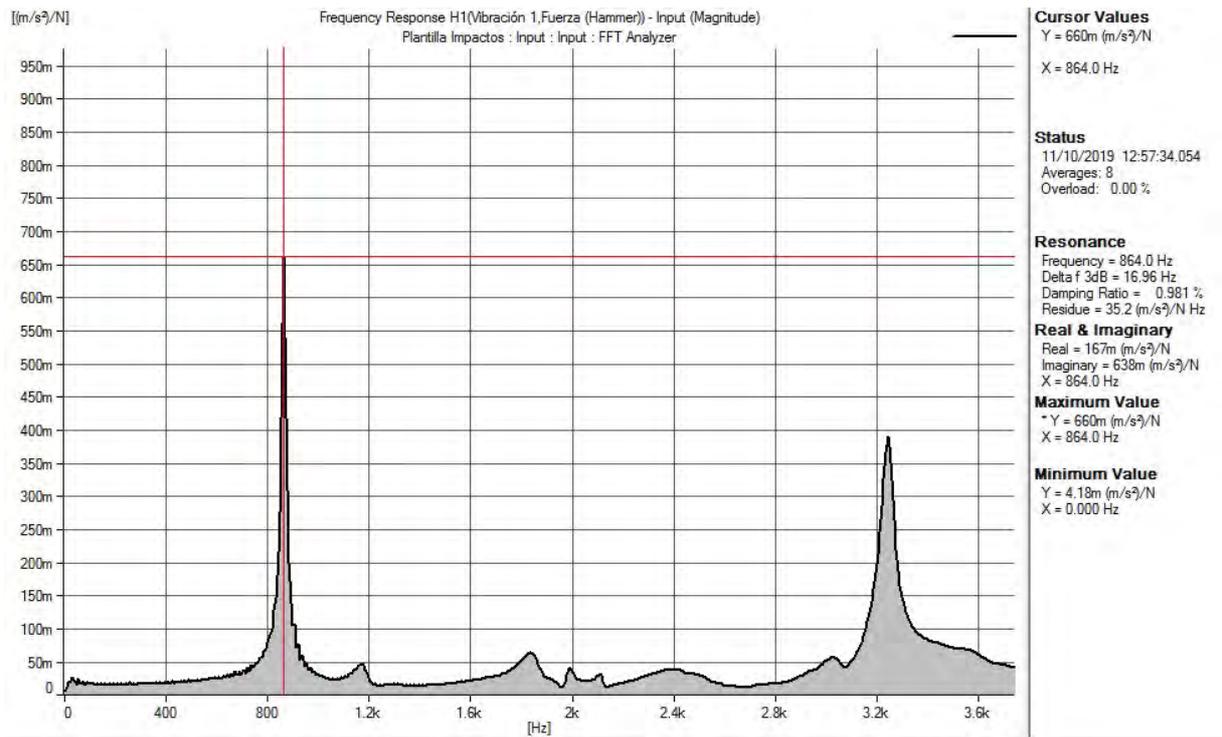
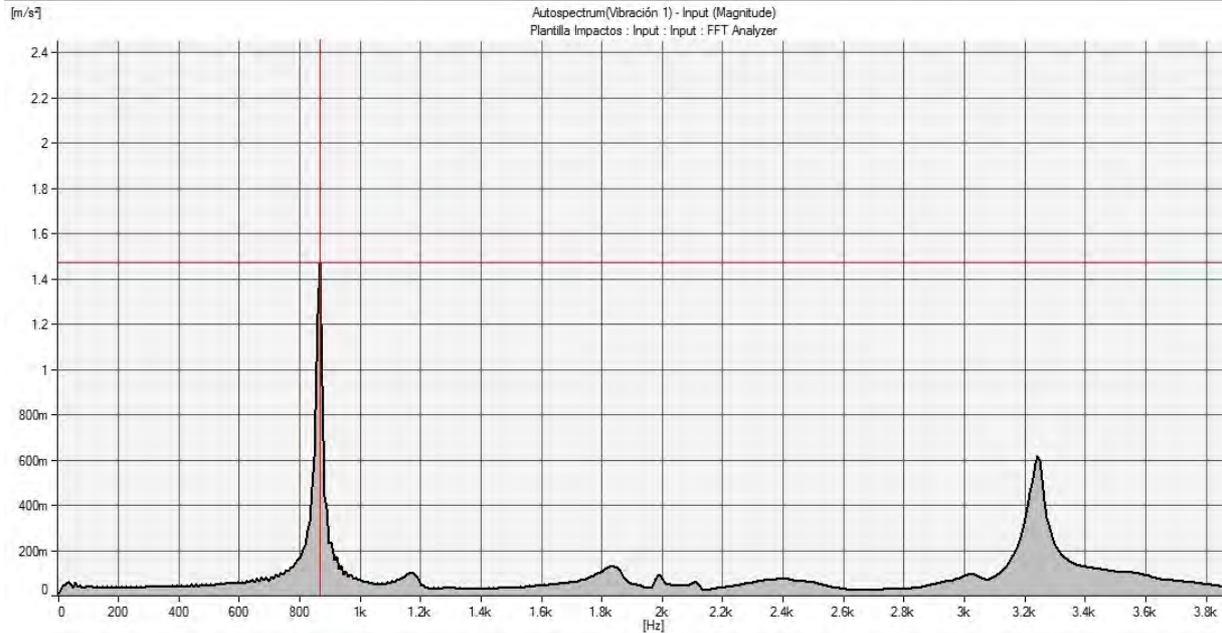
Resonance
Frequency = 1.808k Hz
Delta f 3dB = 21.11 Hz
Damping Ratio = 0.583 %
Residue = 13.1 (m/s²)/N Hz

Real & Imaginary
Real = 116m (m/s²)/N
Imaginary = -53.3m (m/s²)/N
X = 1.792k Hz

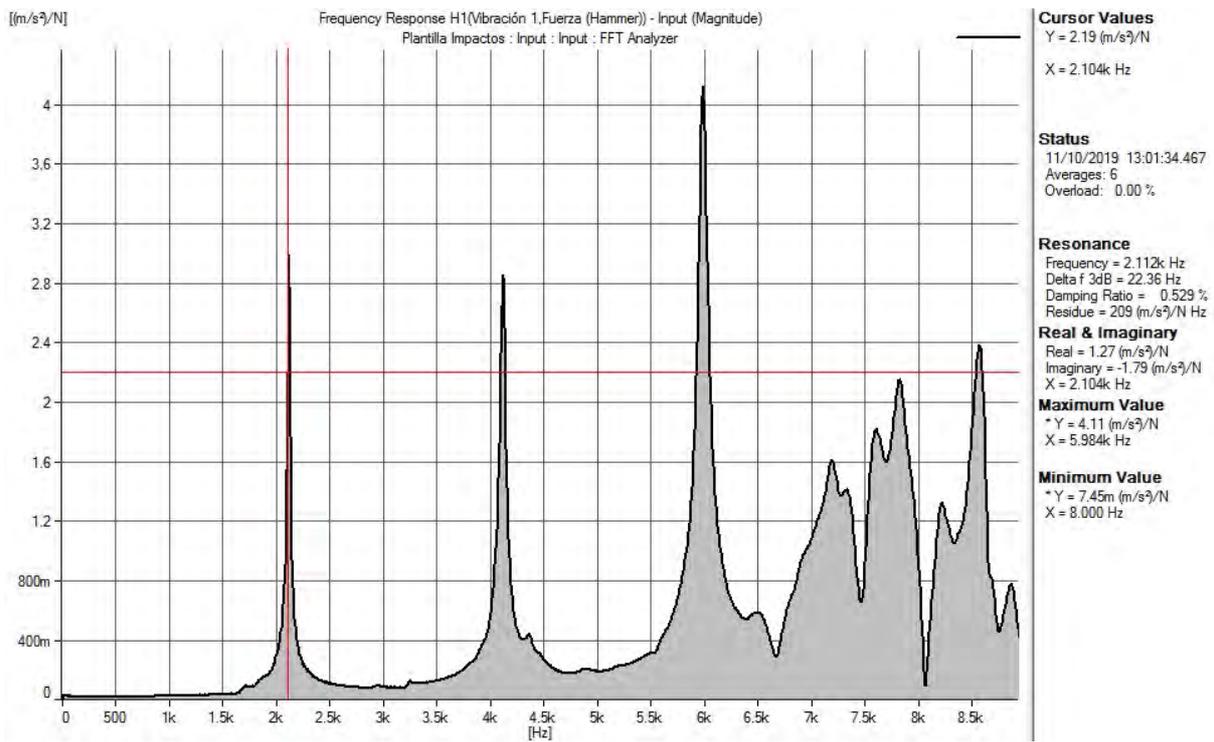
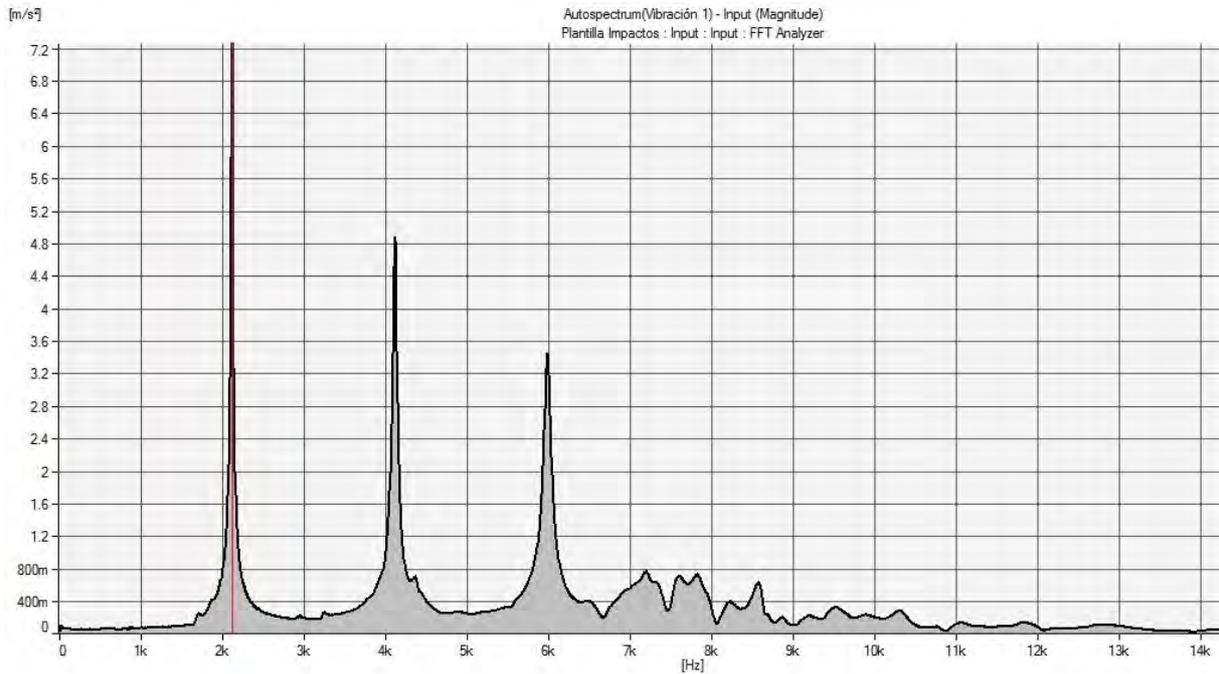
Maximum Value
*Y = 406m (m/s²)/N
X = 2.936k Hz

Minimum Value
Y = 440u (m/s²)/N
X = 920.0 Hz

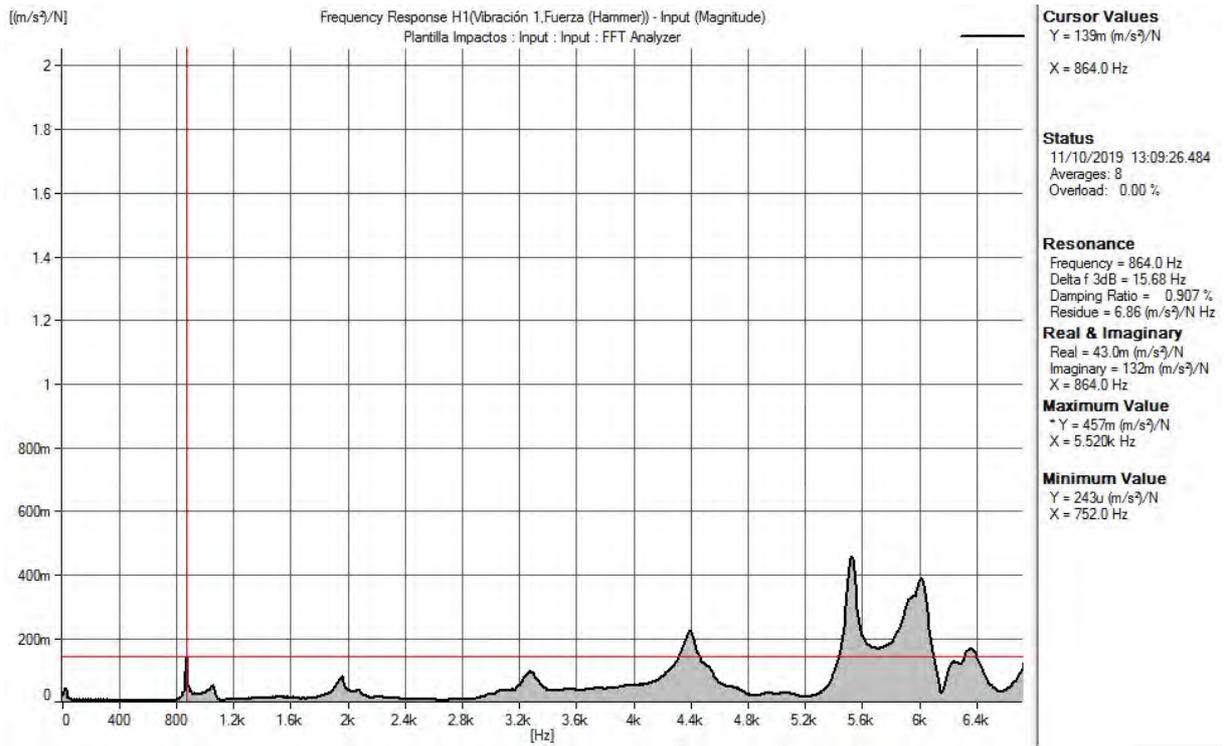
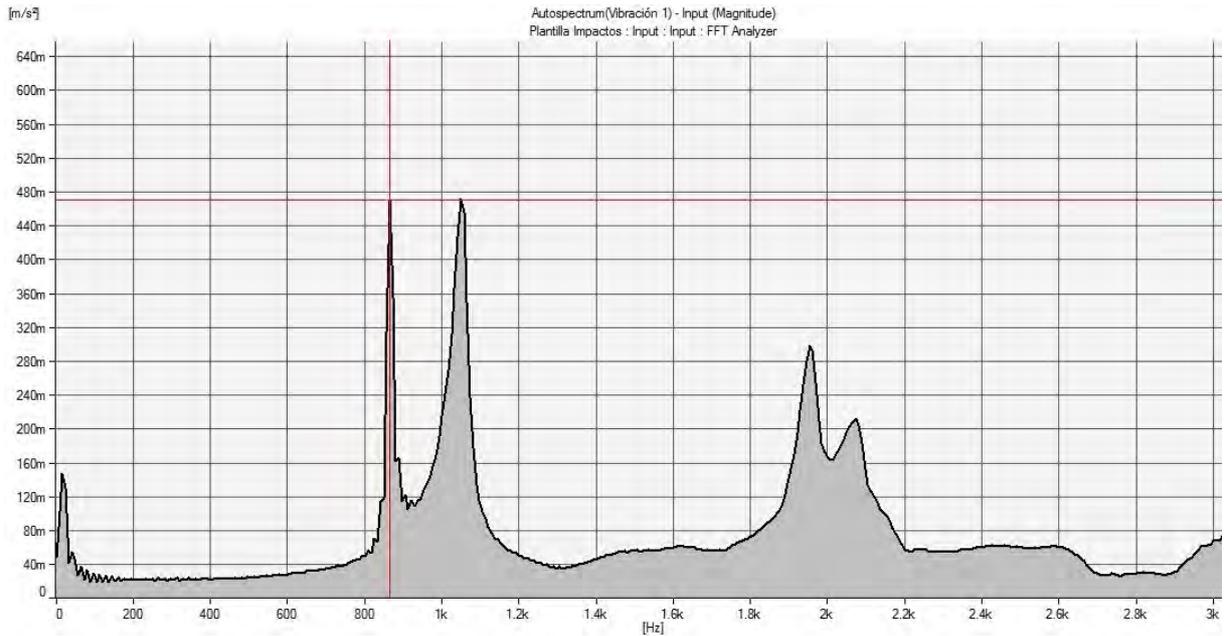
Probeta 3. Modo transversal



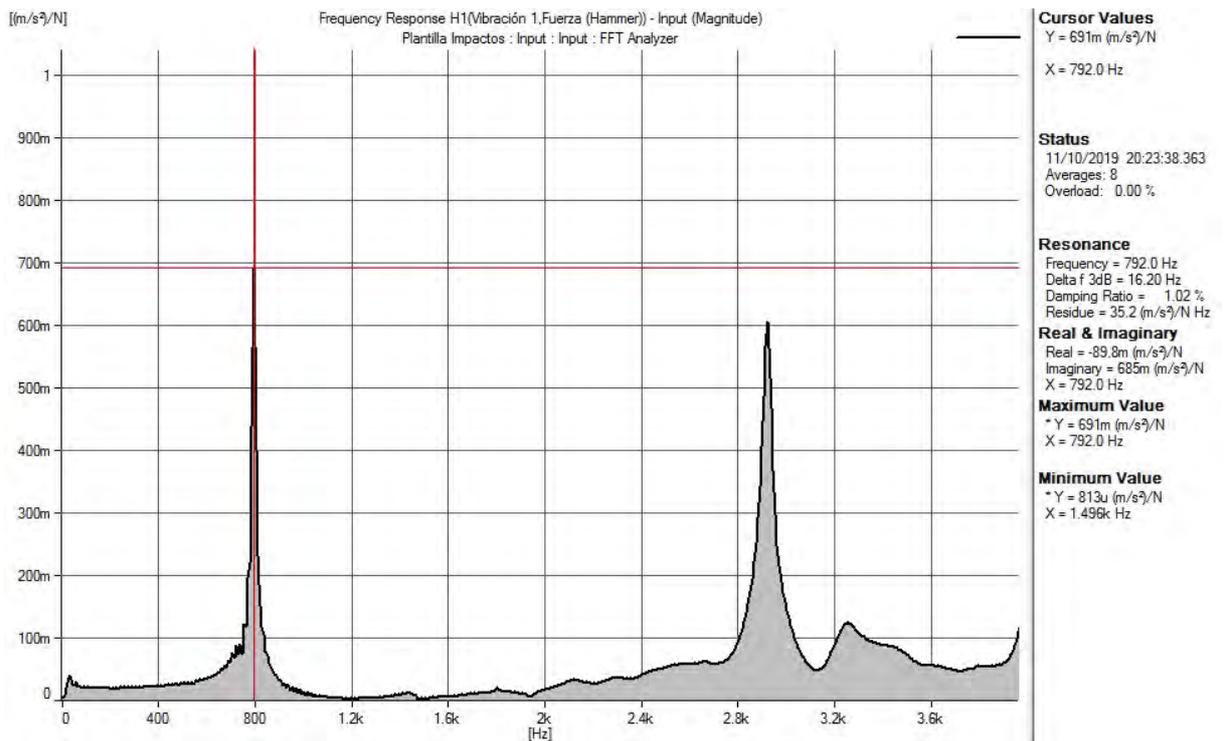
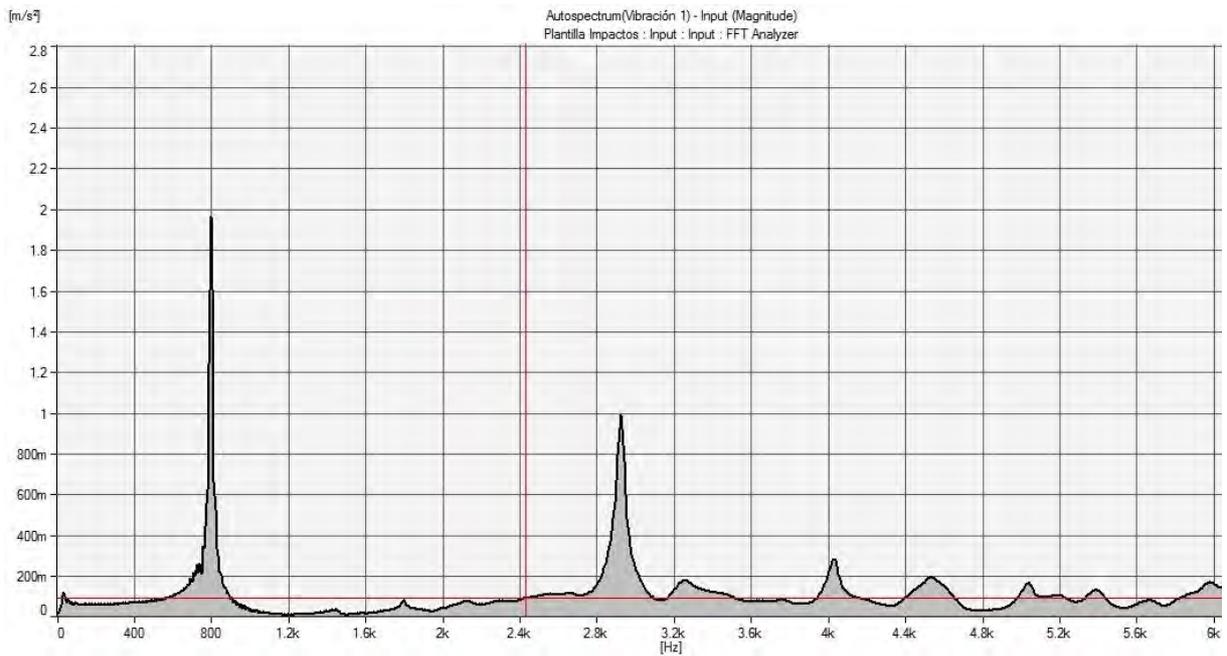
Probeta 3. Modo longitudinal



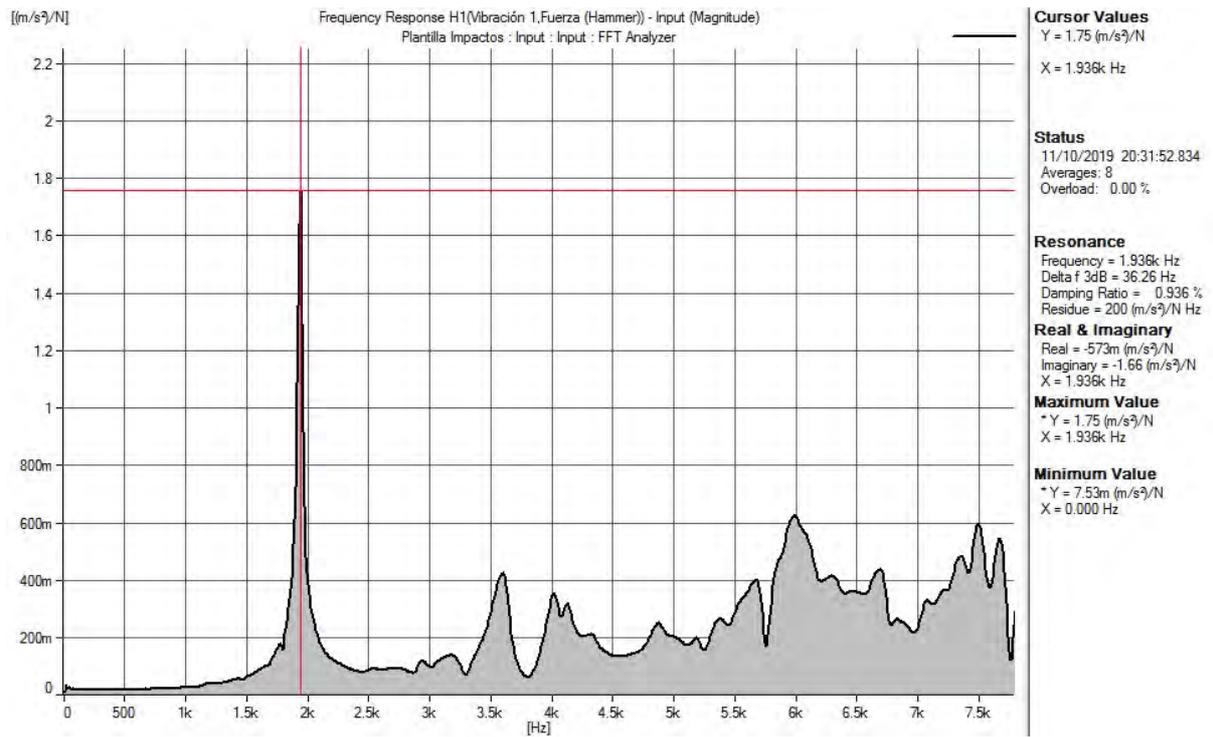
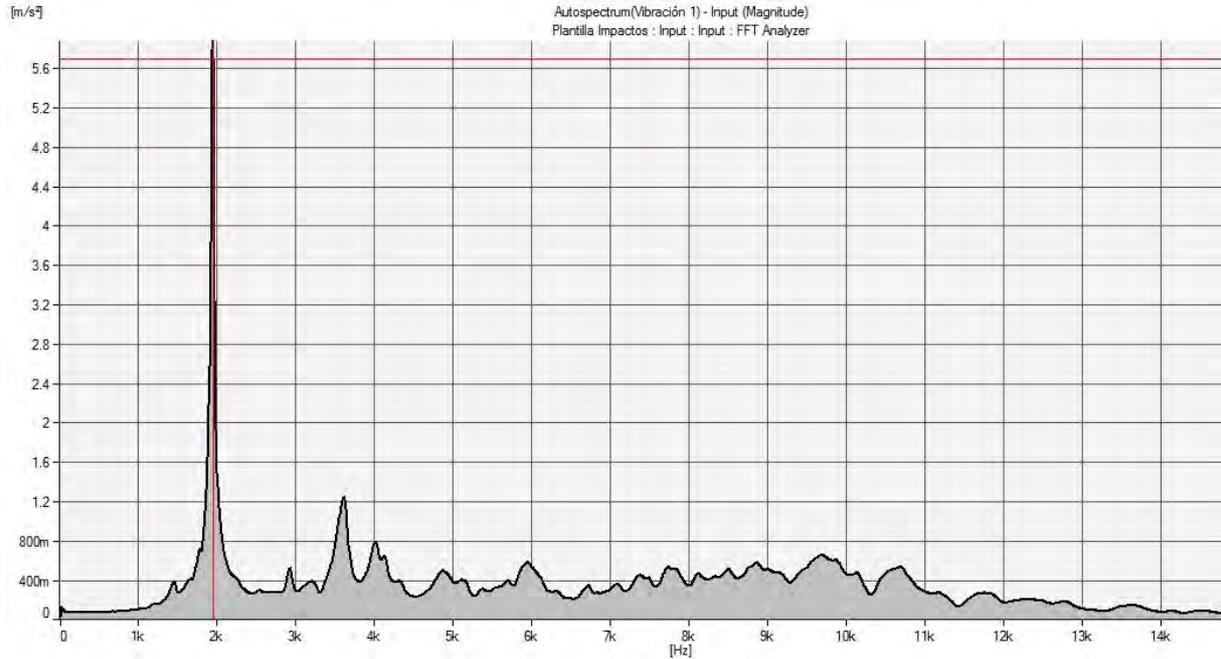
Probeta 3. Modo torsional



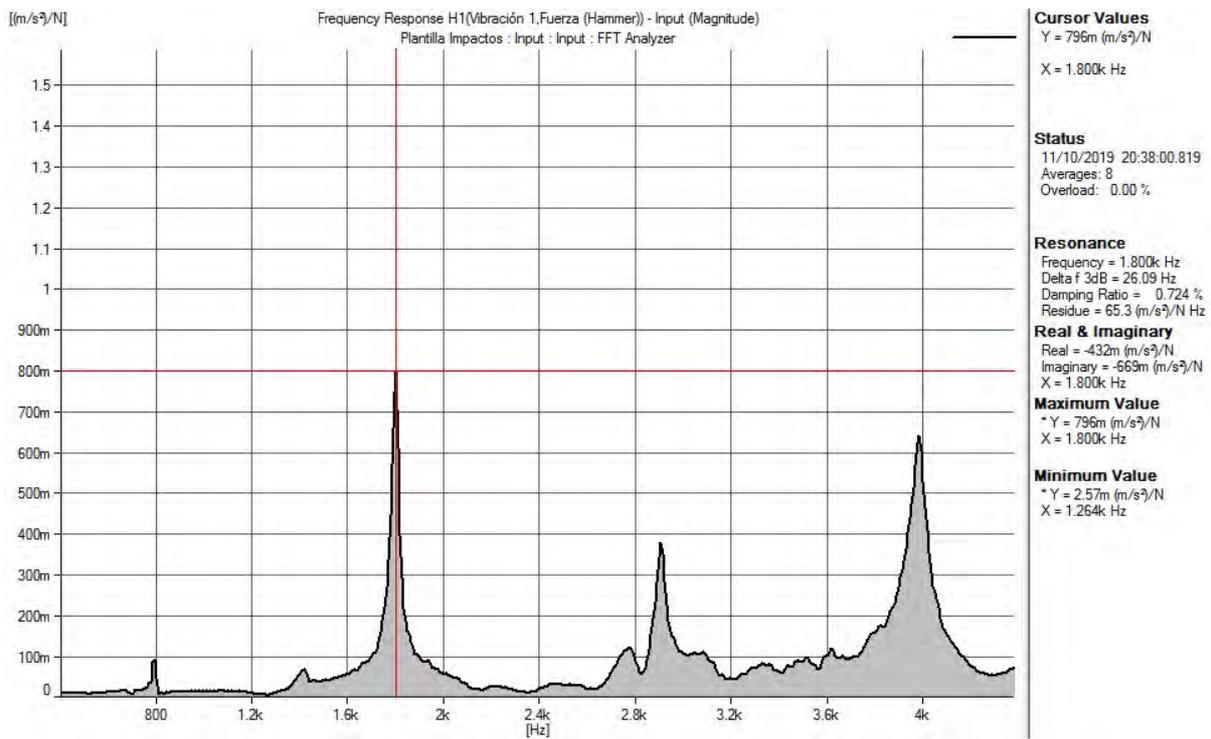
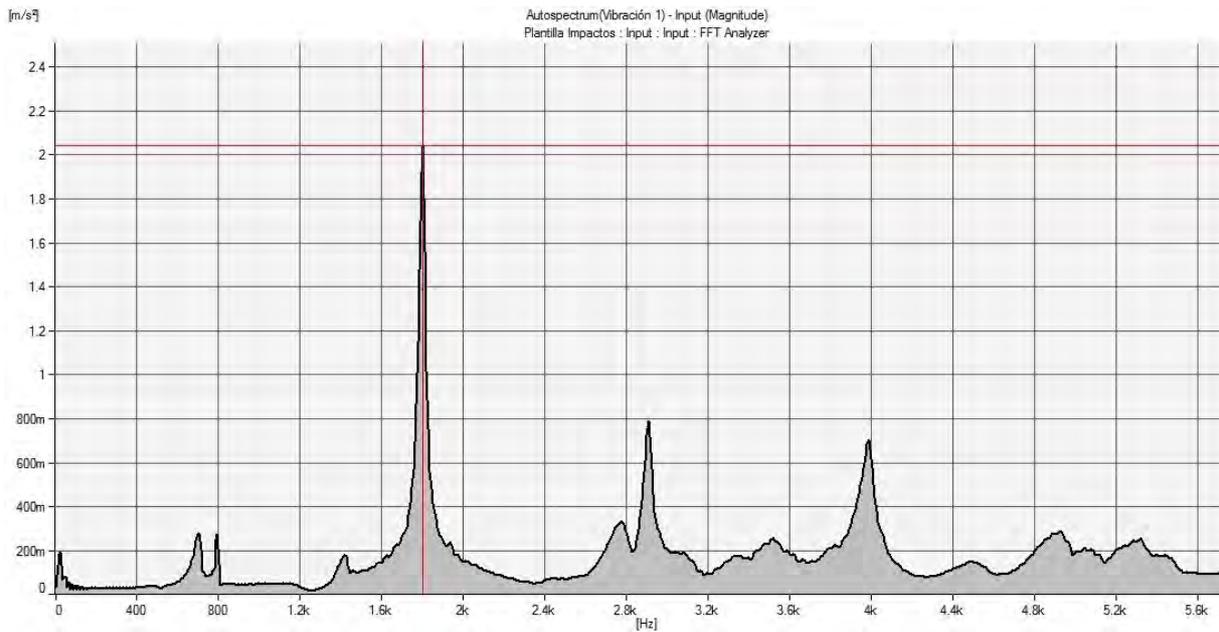
Probeta 4. Modo transversal



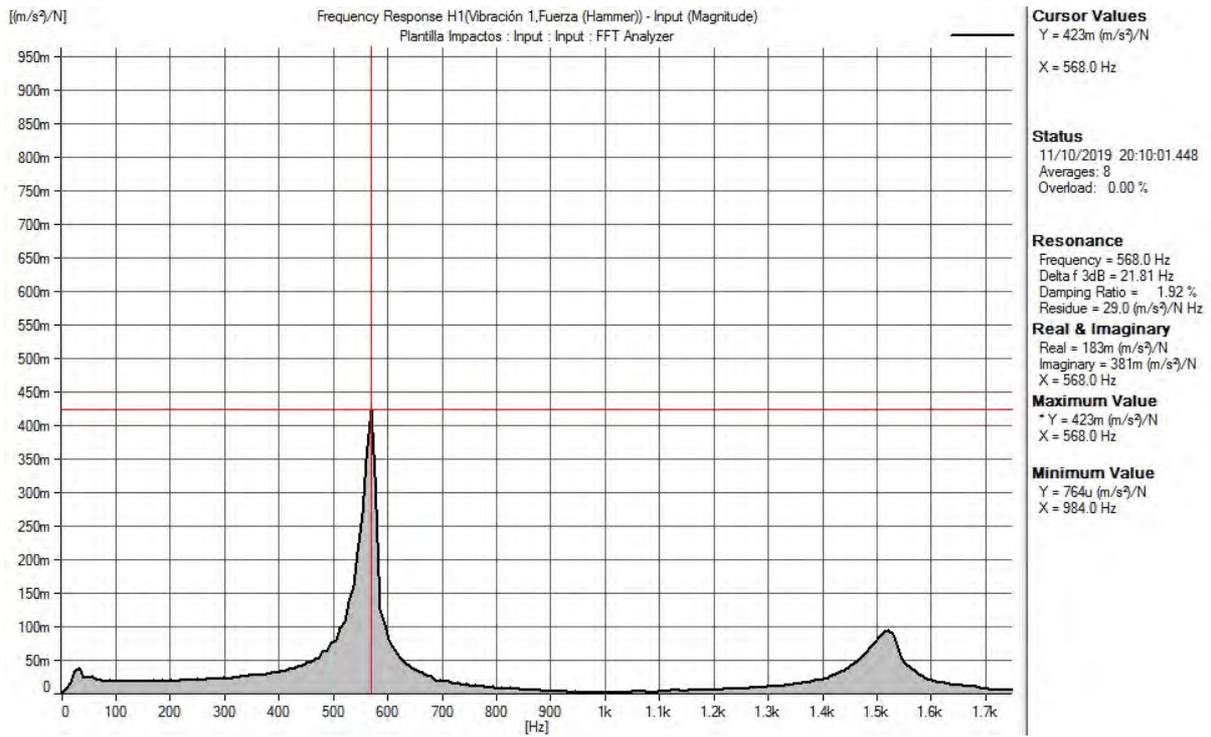
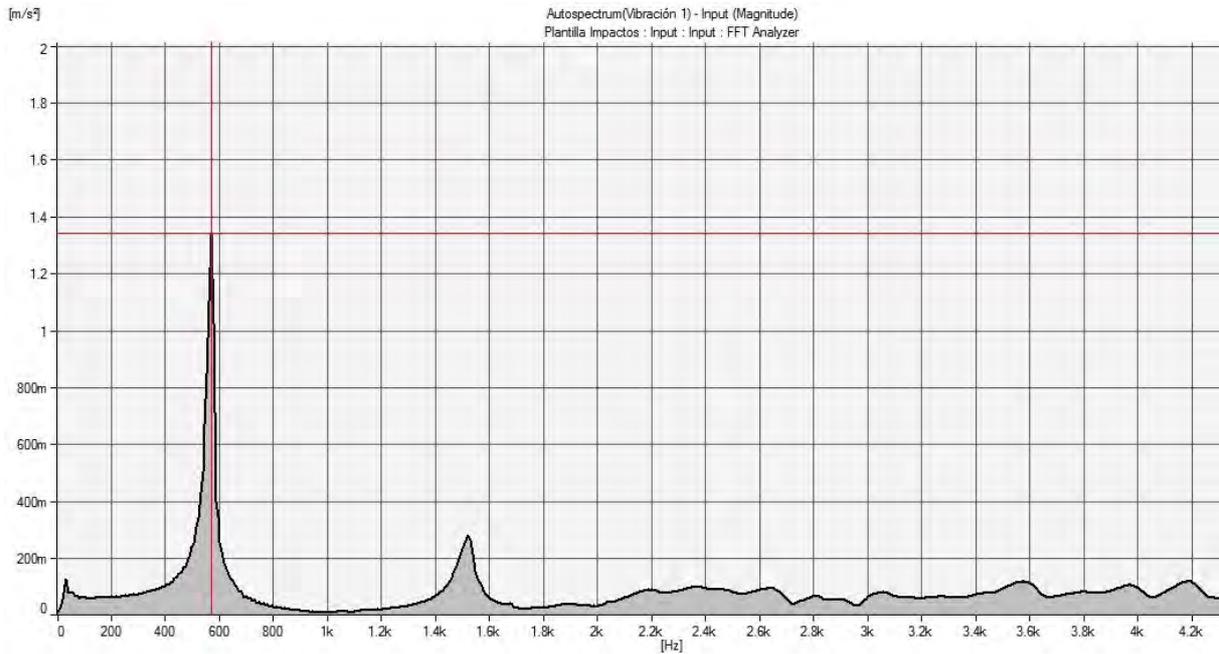
Probeta 4. Modo longitudinal



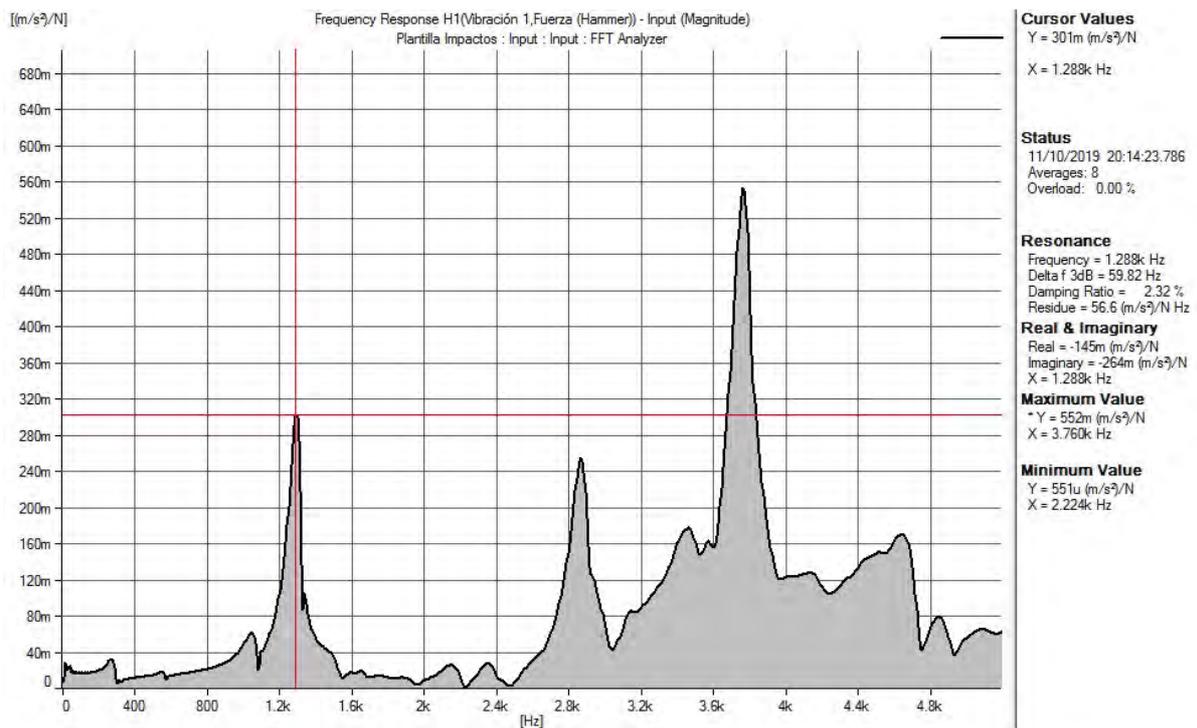
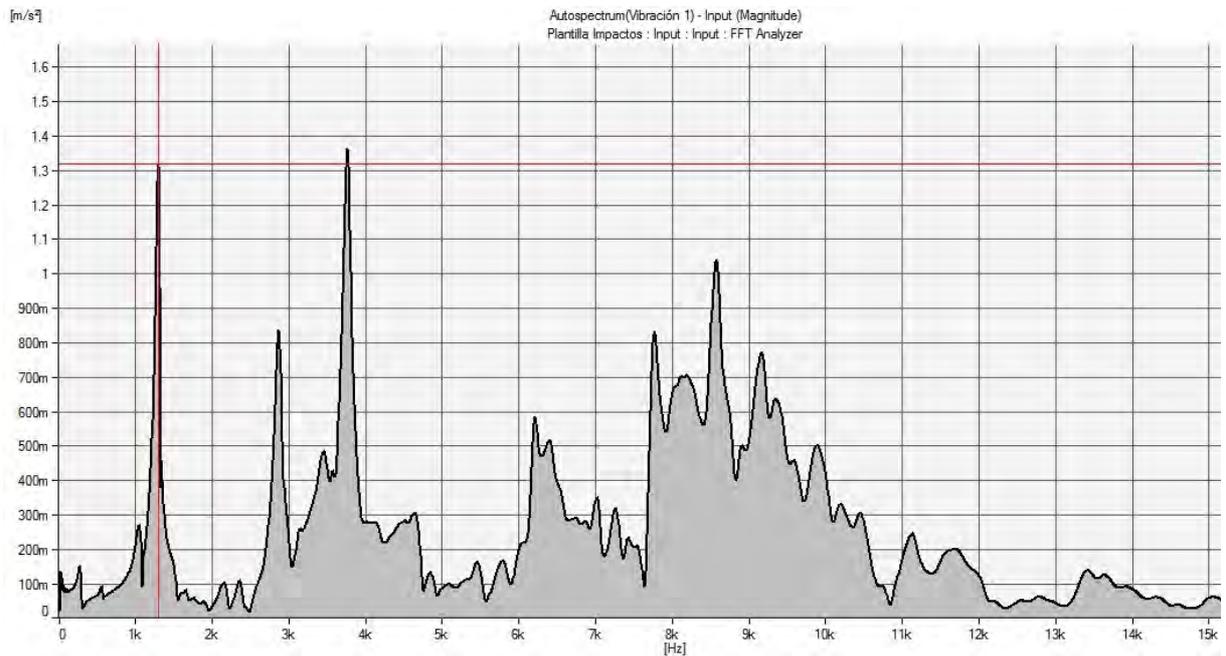
Probeta 4. Modo torsional



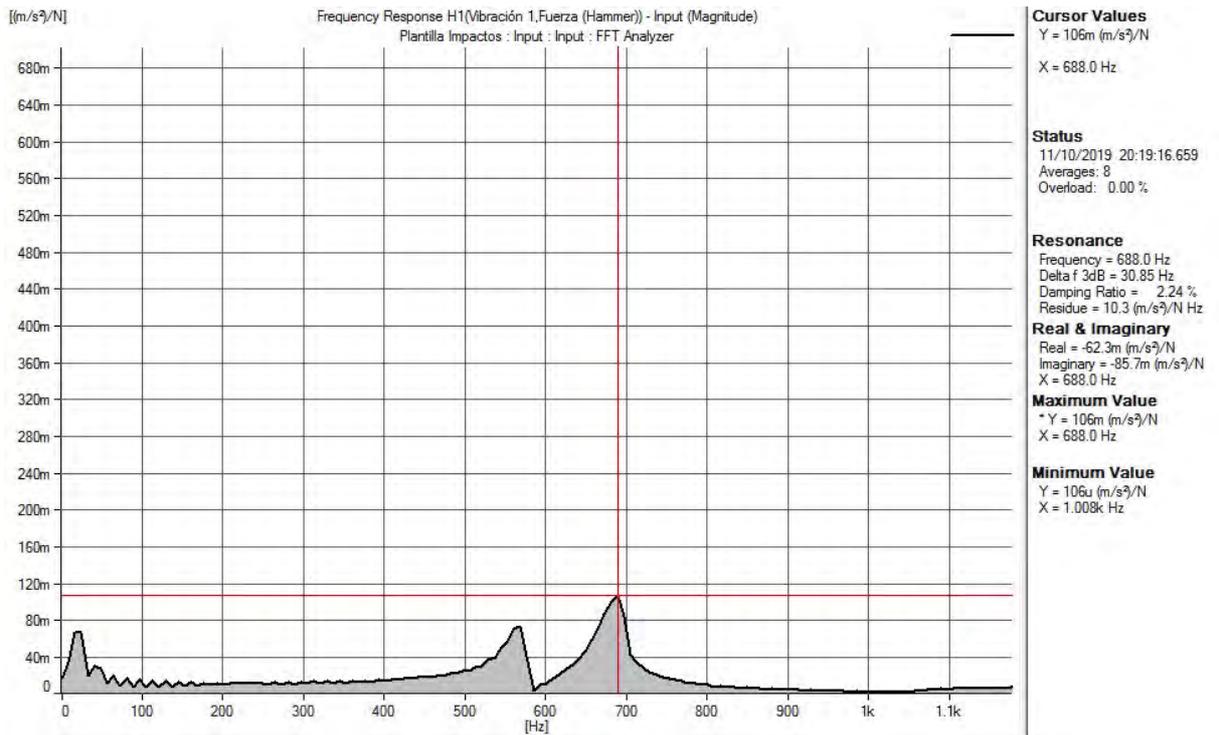
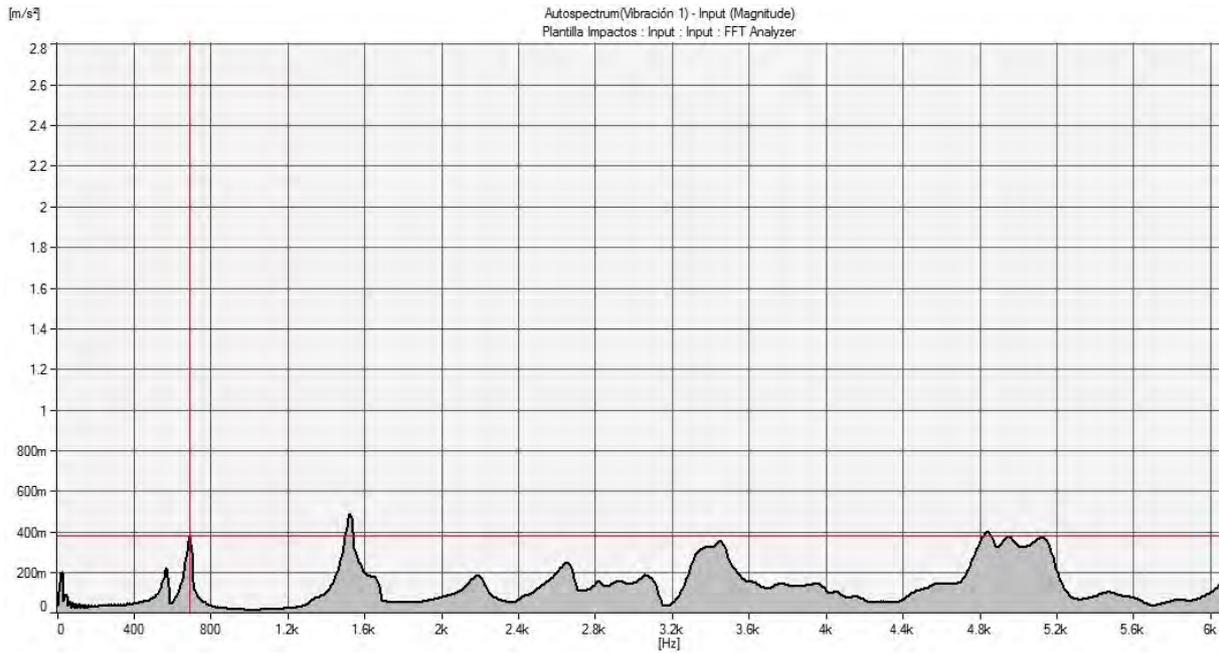
Probeta 5. Modo transversal



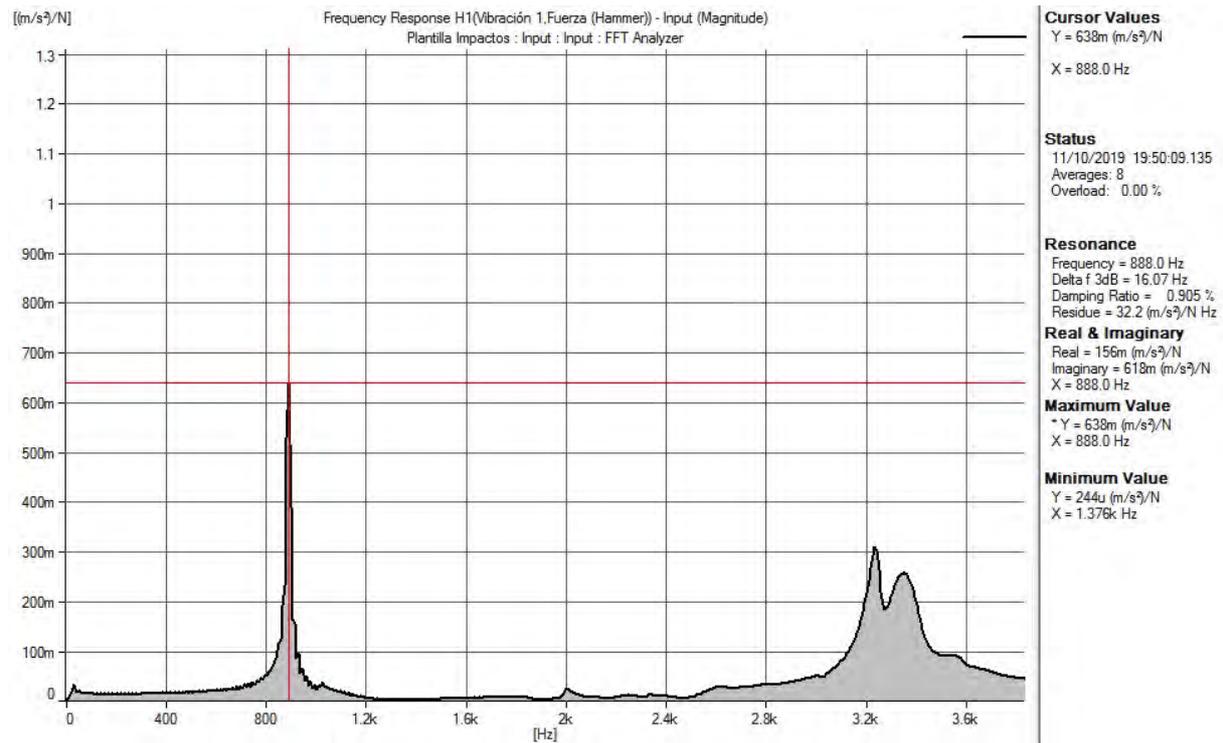
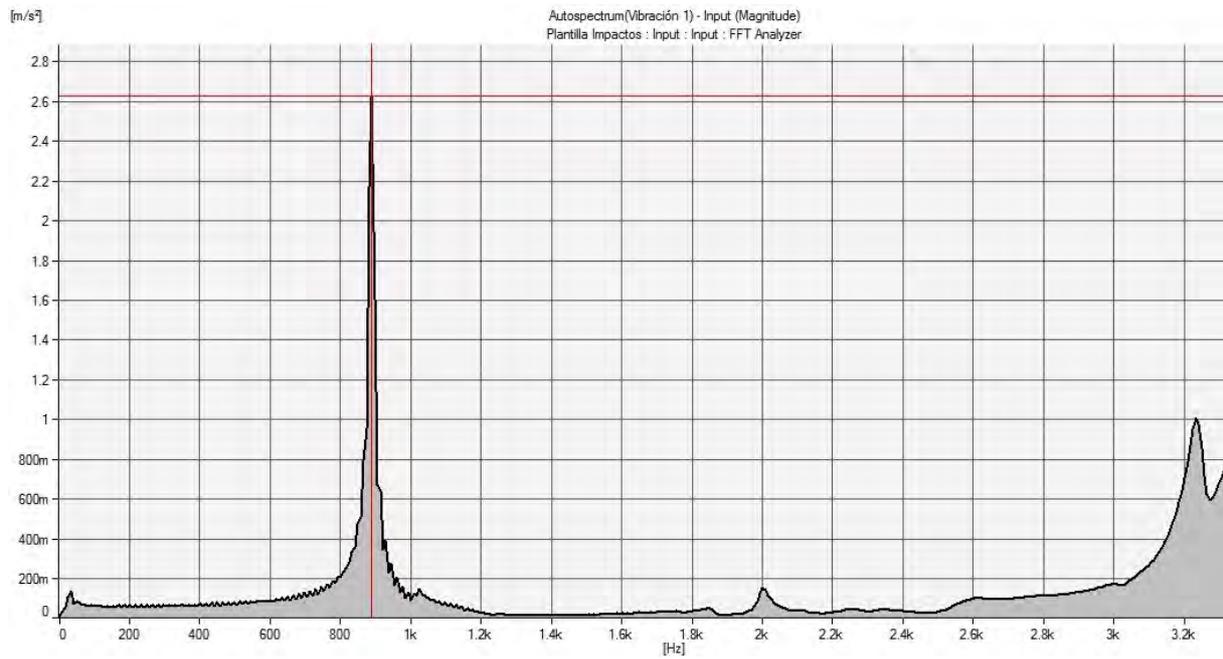
Probeta 5. Modo longitudinal



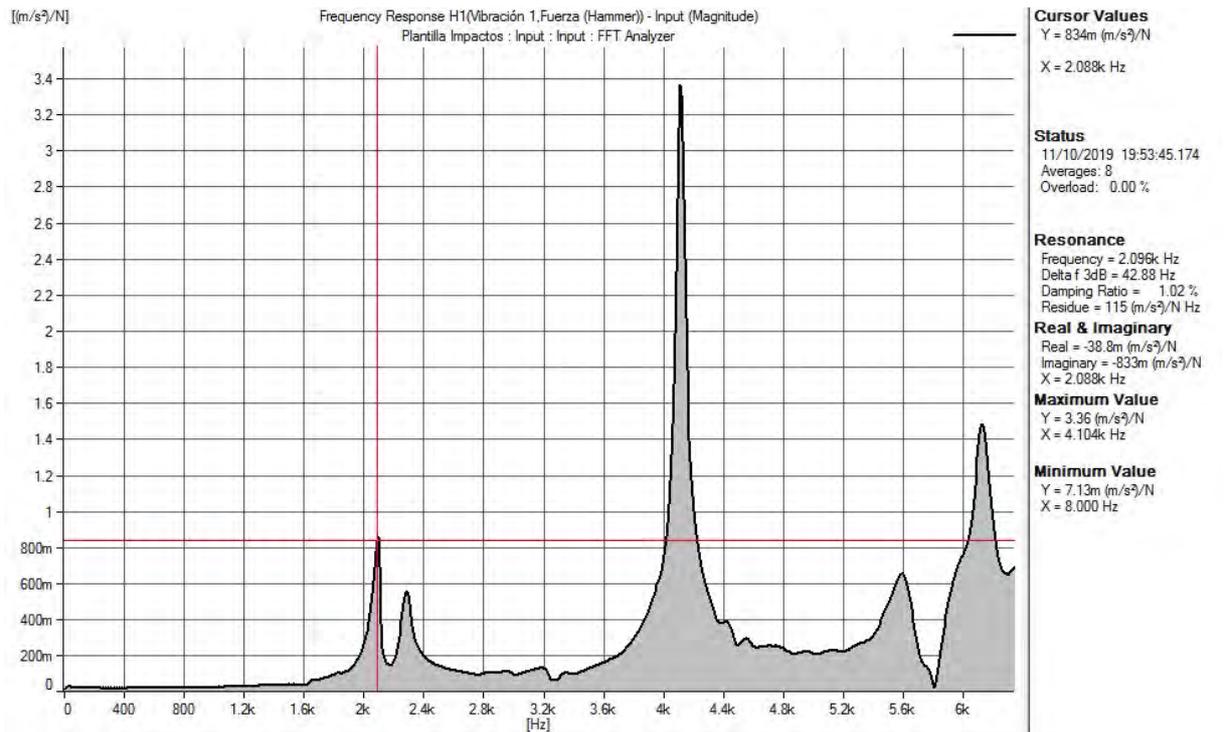
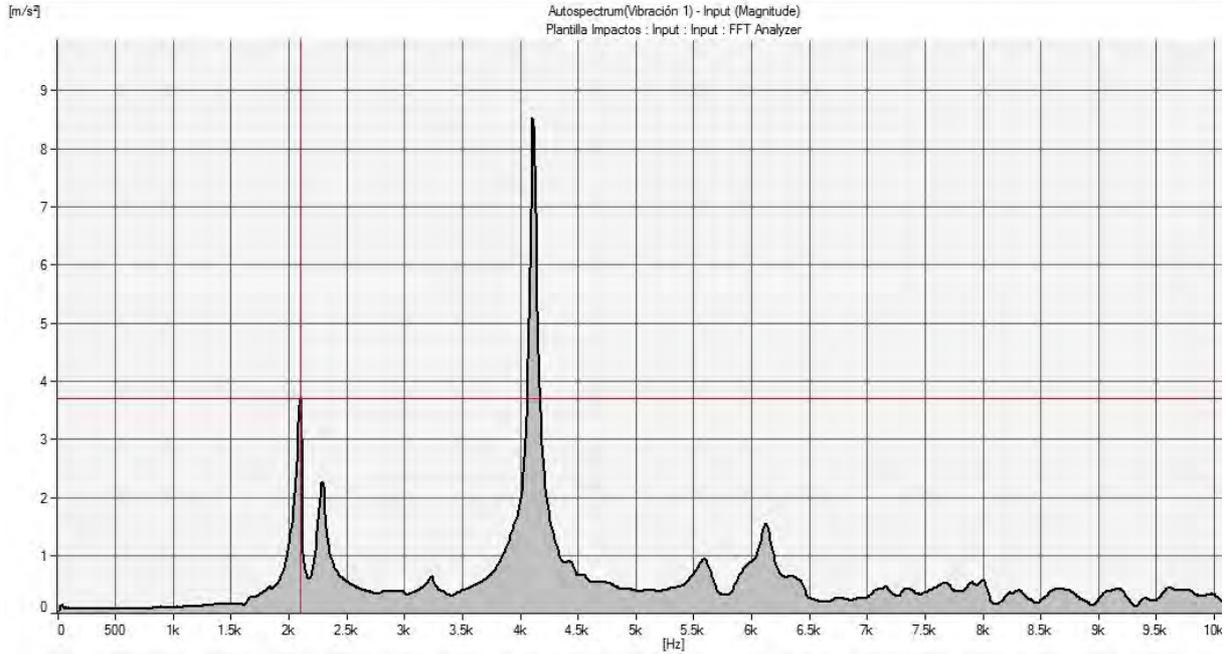
Probeta 5. Modo torsional



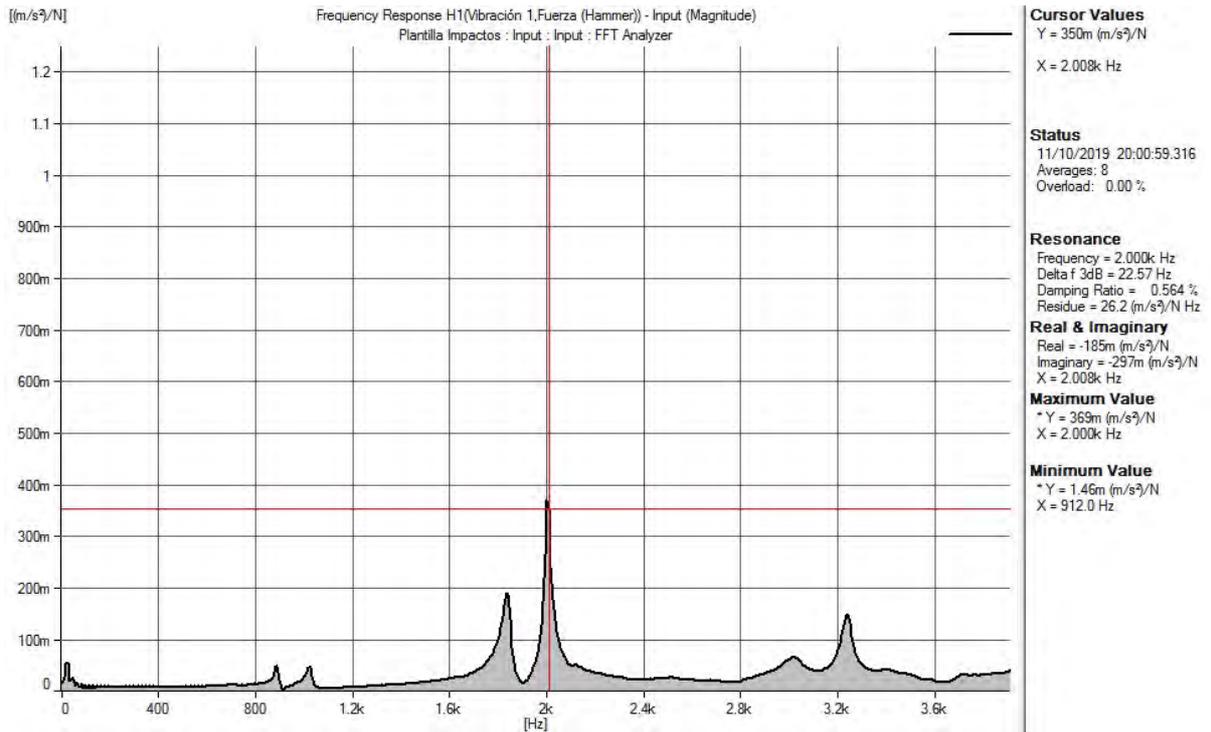
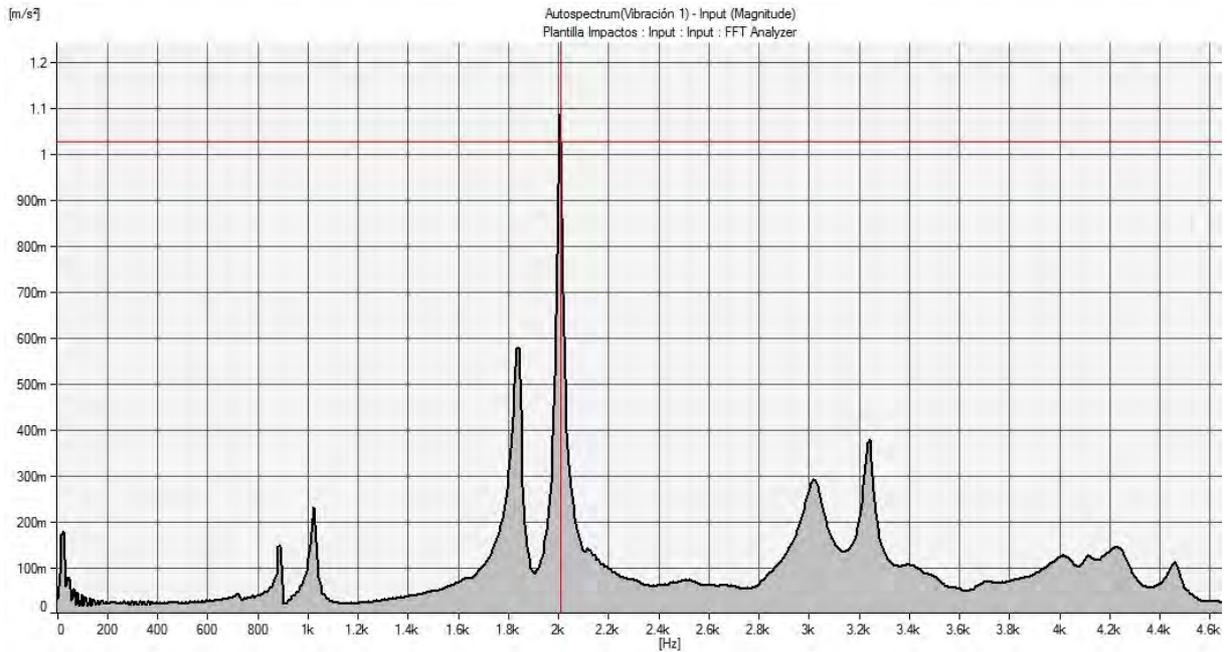
Probeta 6. Modo transversal



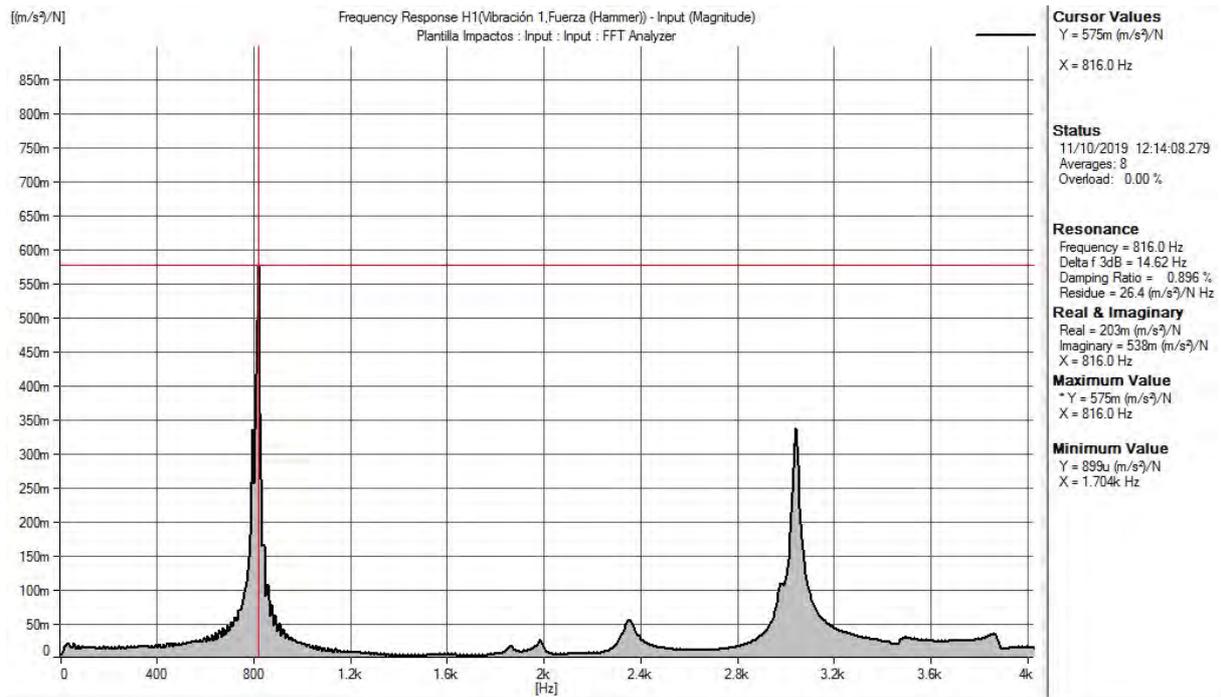
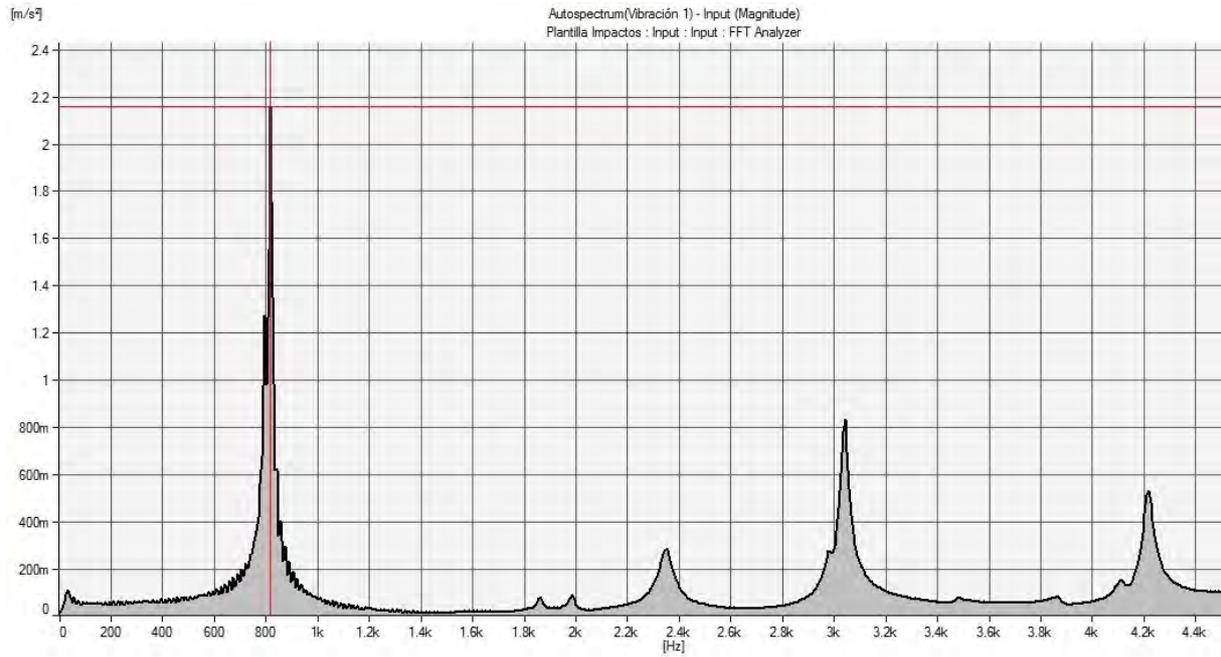
Probeta 6. Modo longitudinal



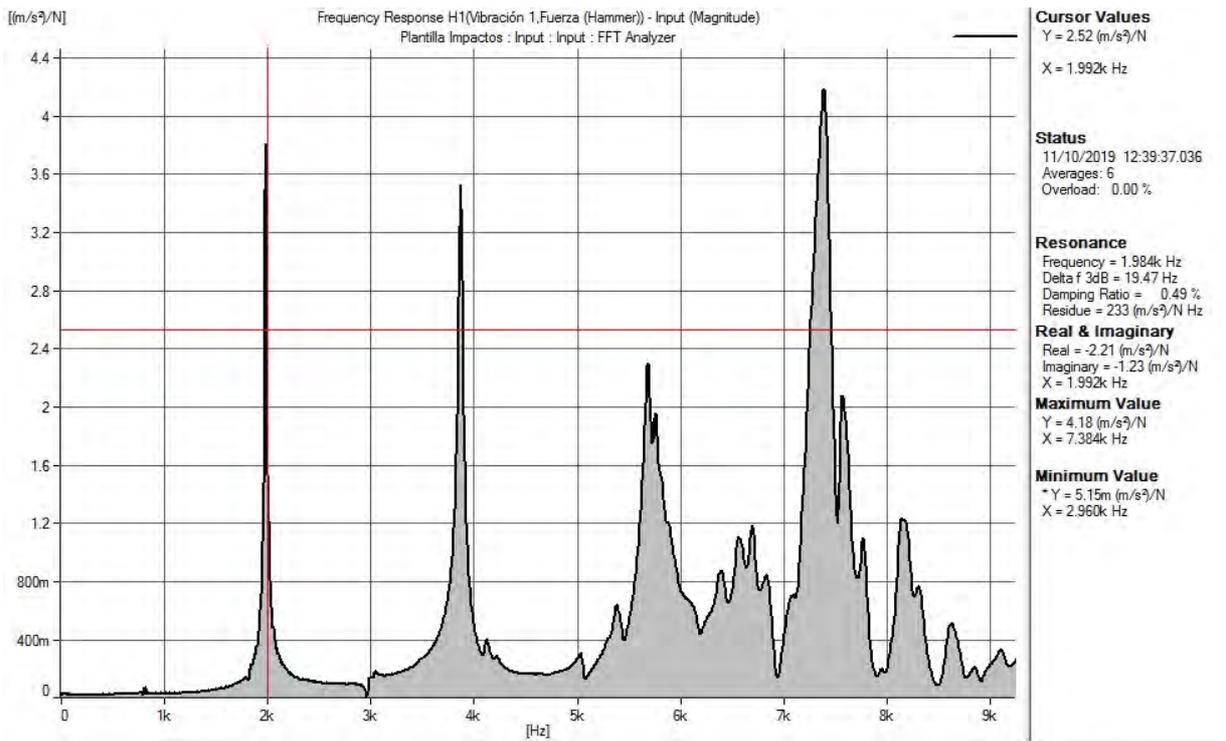
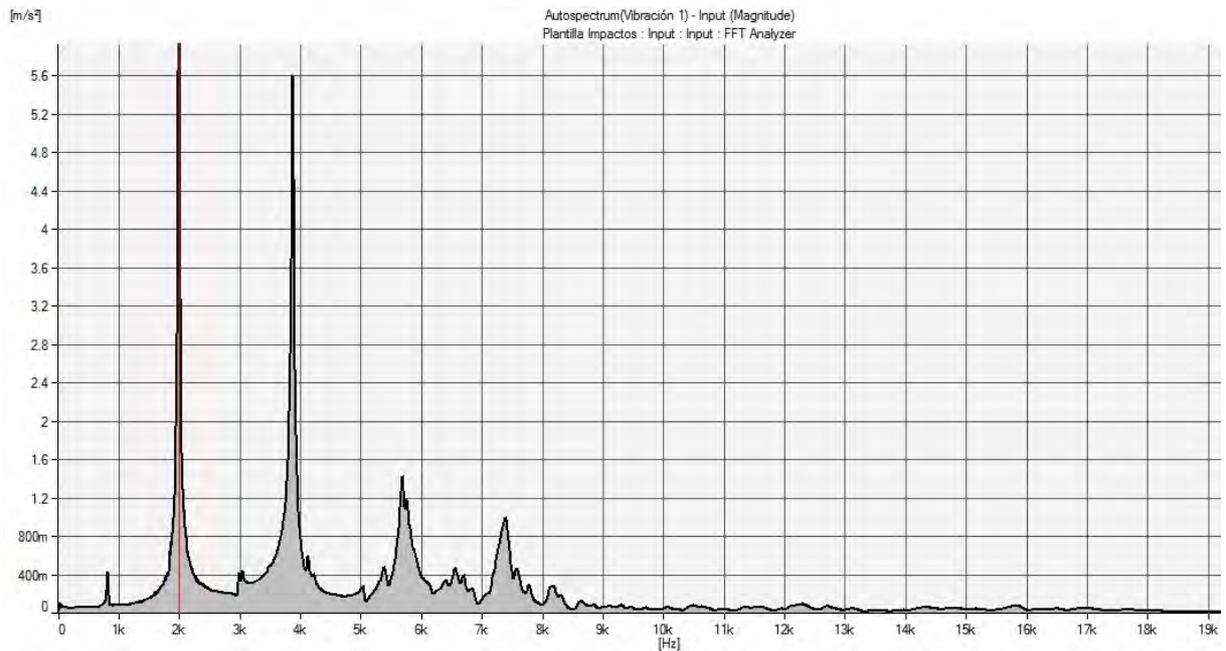
Probeta 6. Modo torsional



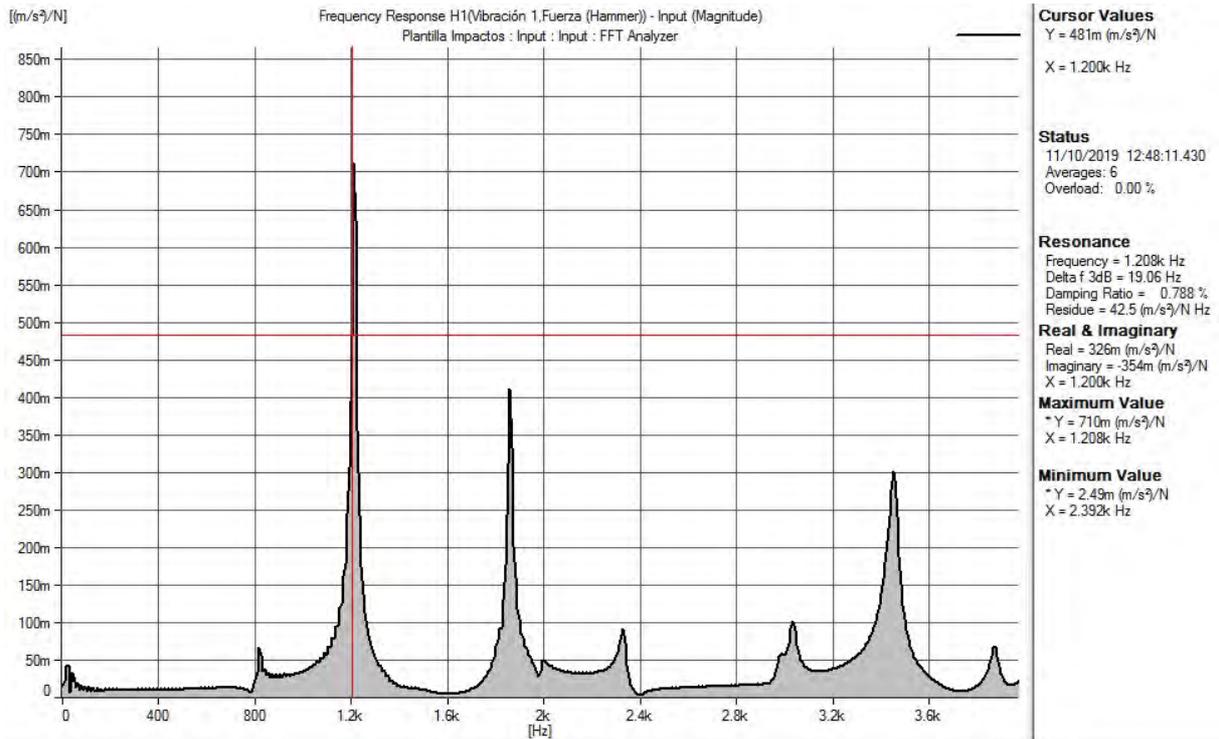
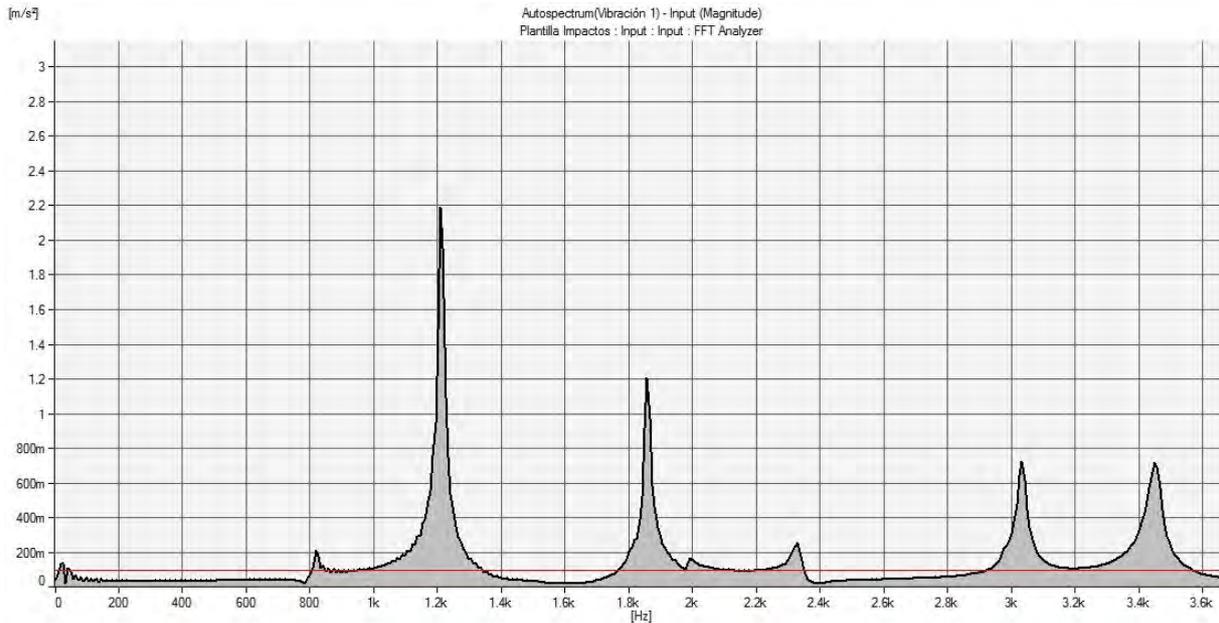
Probeta 7. Modo transversal



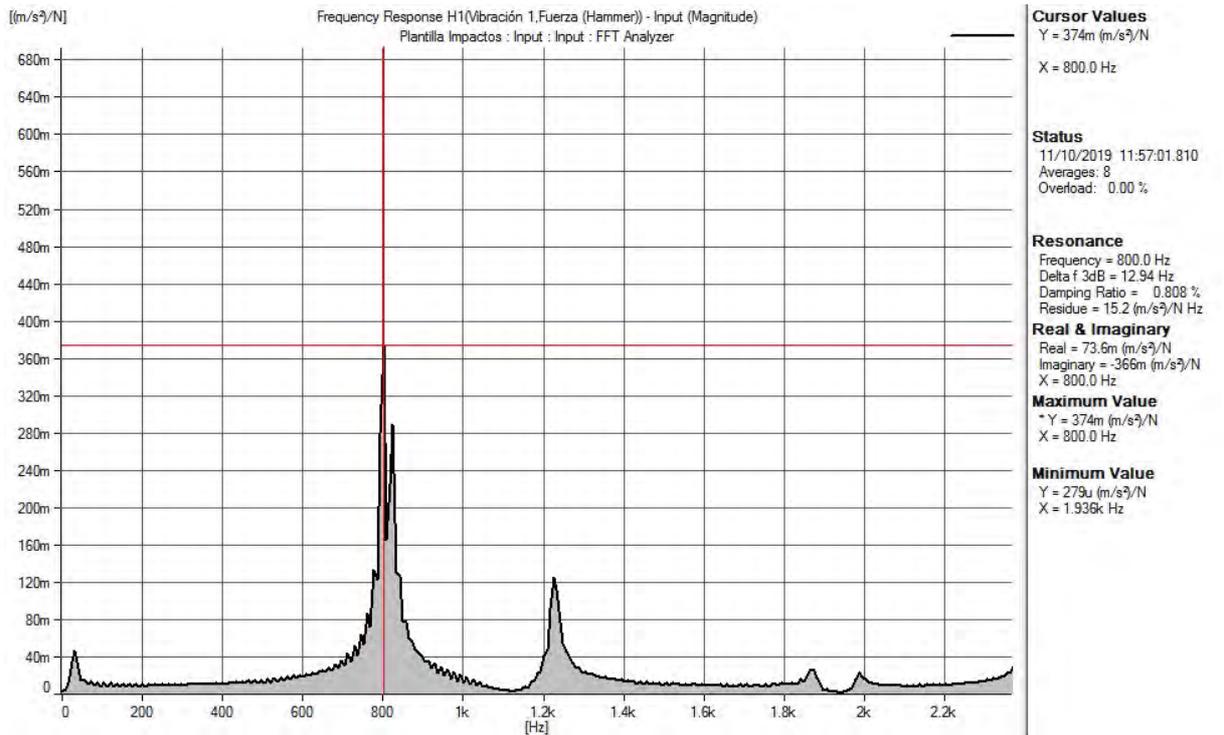
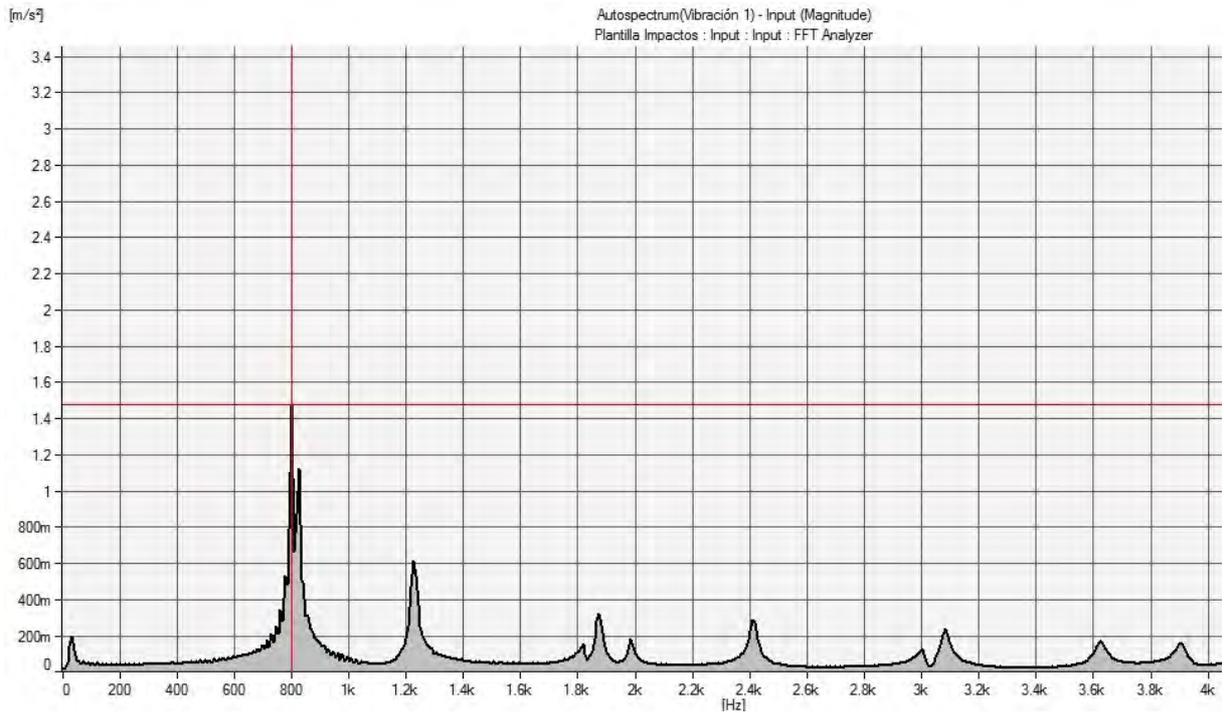
Probeta 7. Modo longitudinal



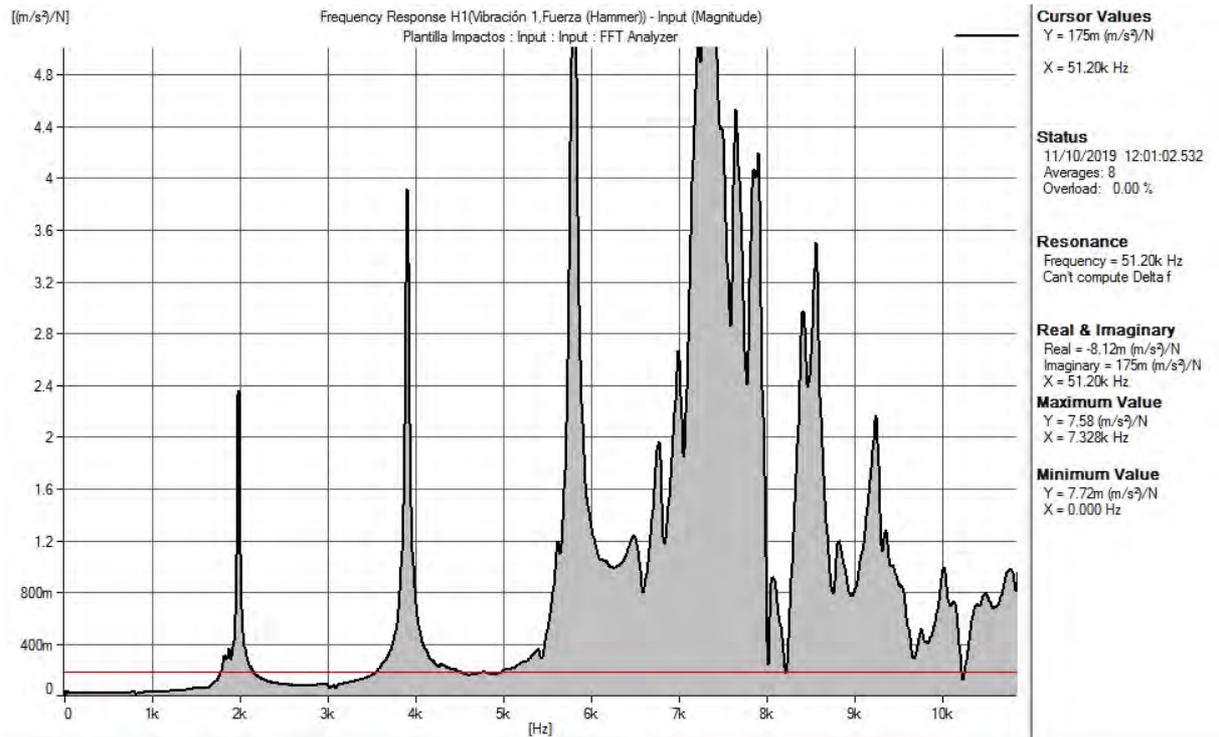
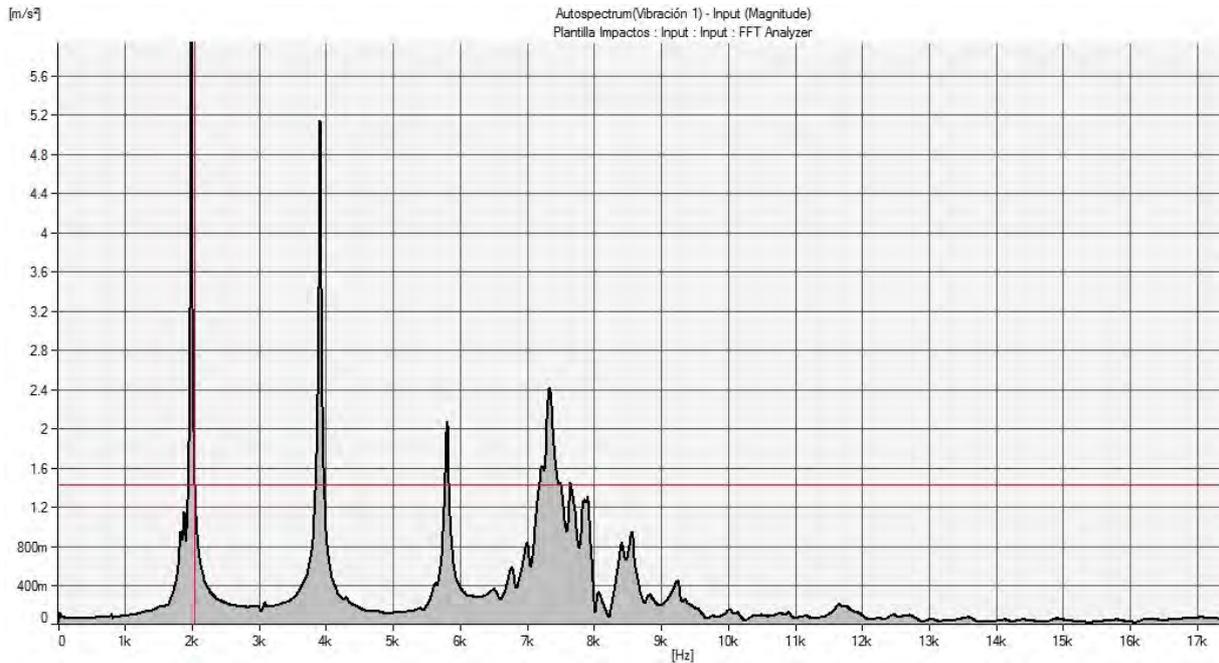
Probeta 7. Modo torsional



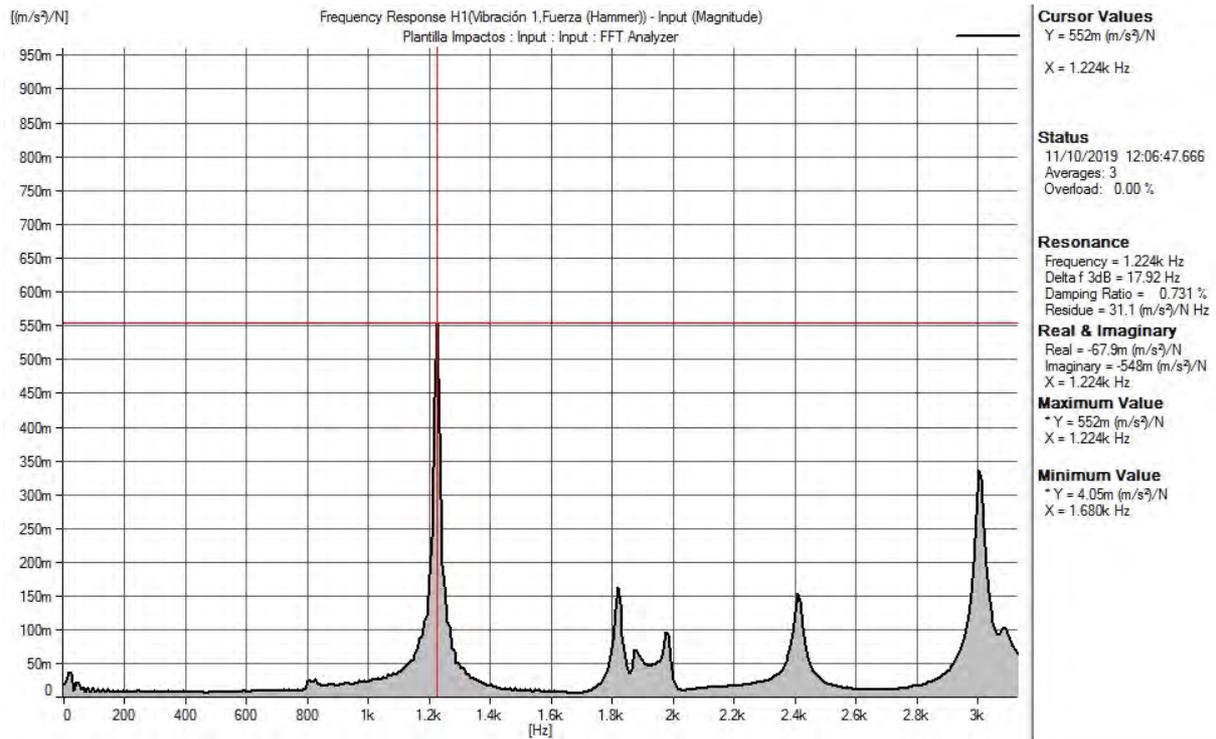
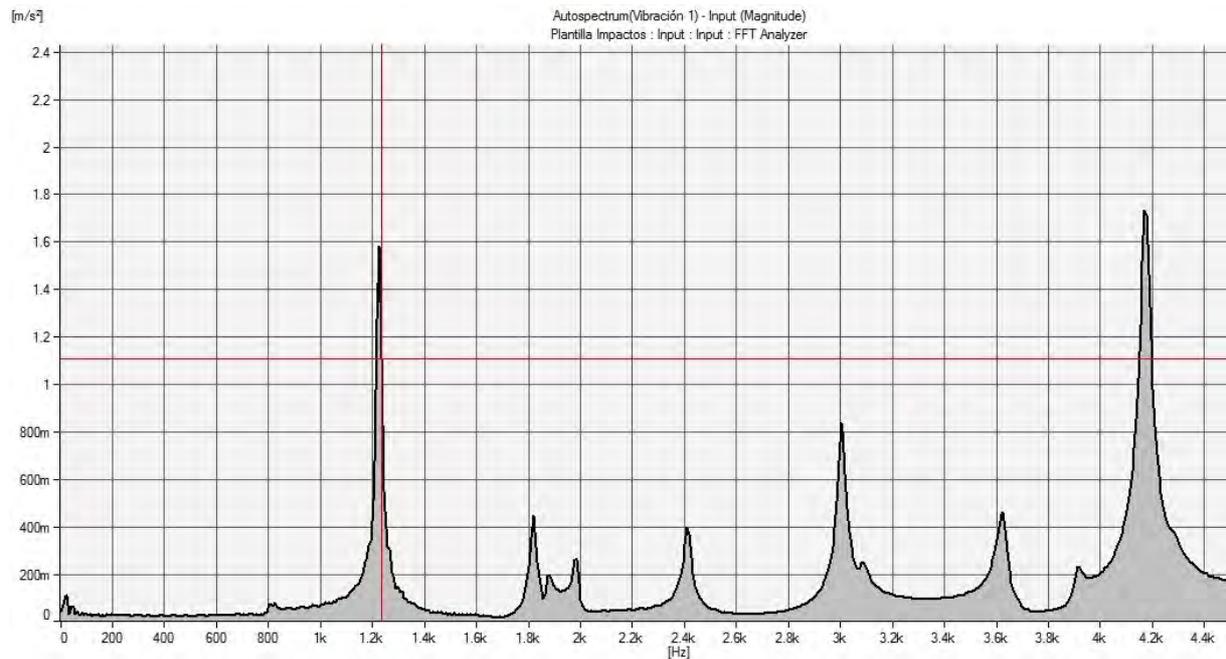
Probeta 8. Modo transversal



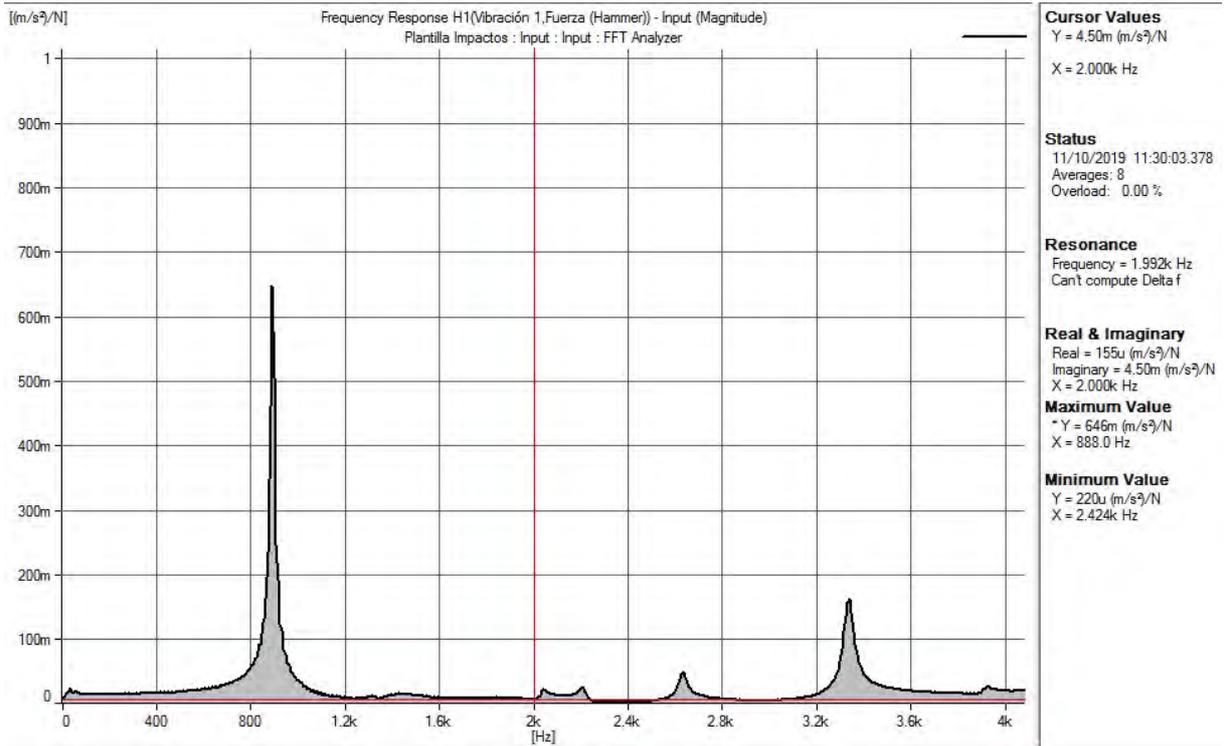
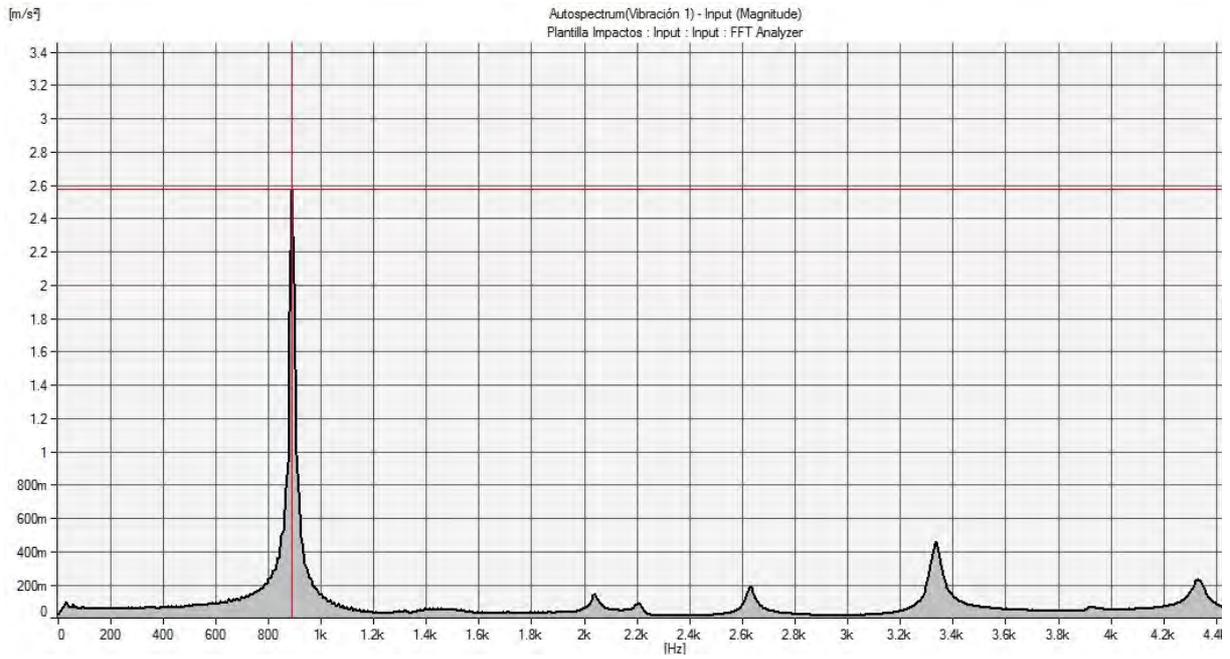
Probeta 8. Modo longitudinal



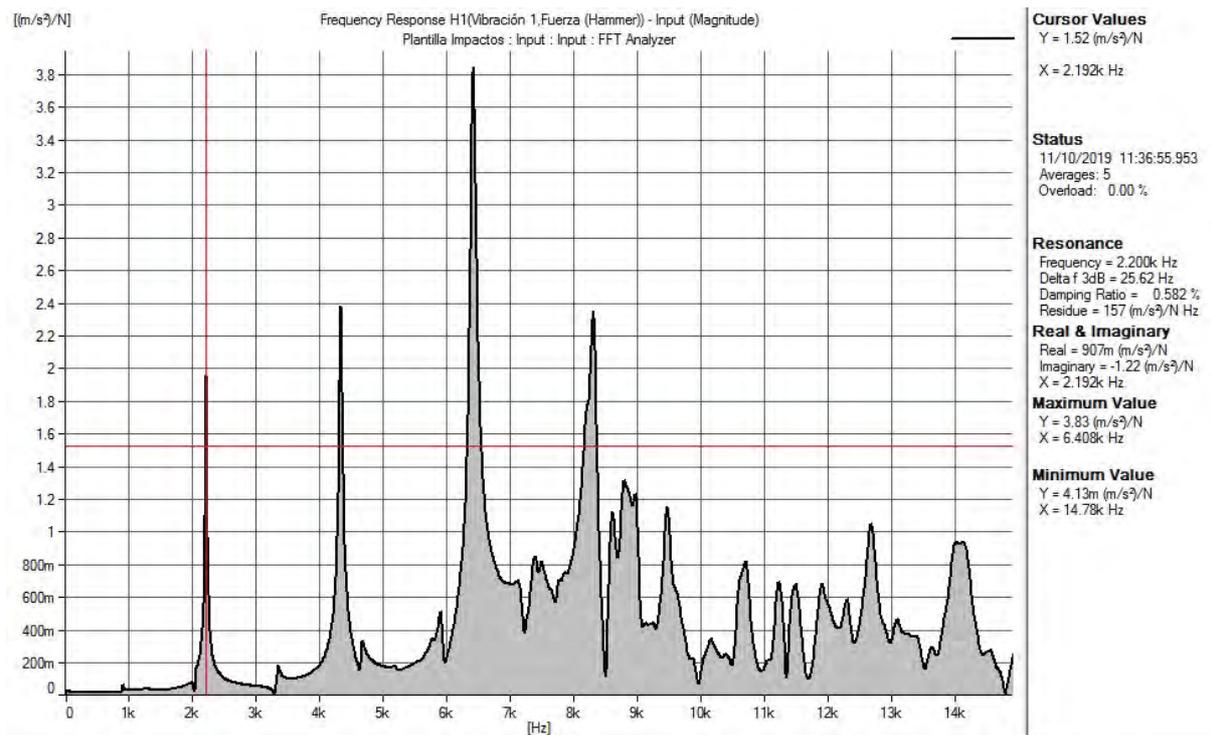
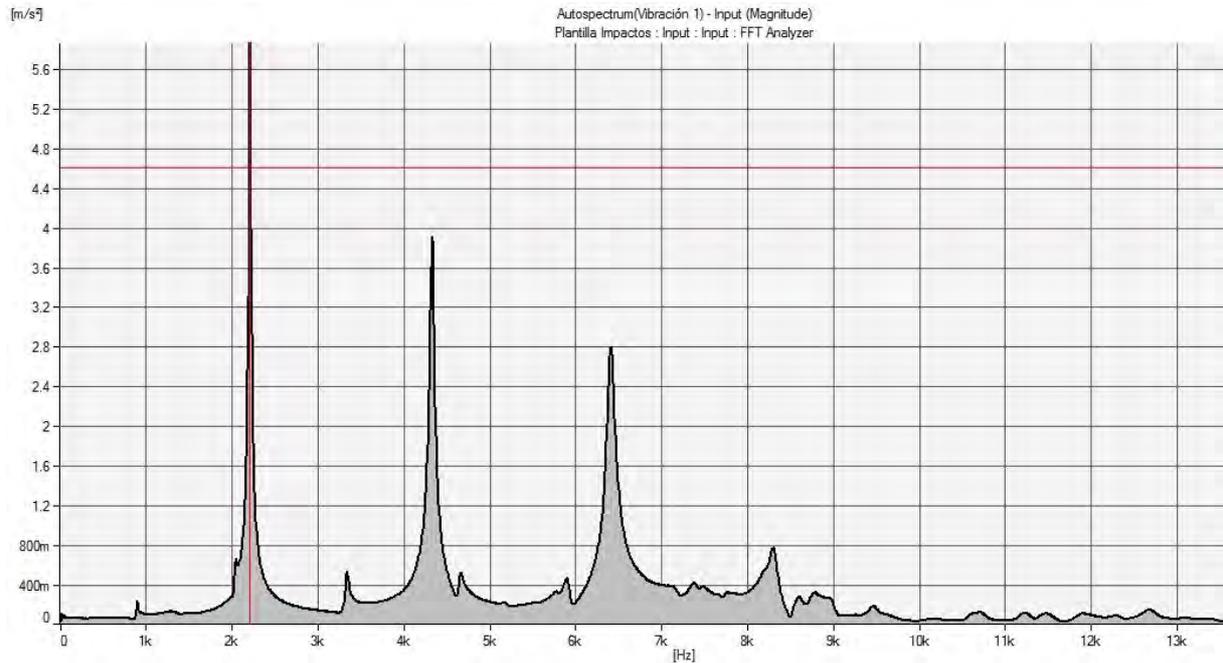
Probeta 8. Modo torsional



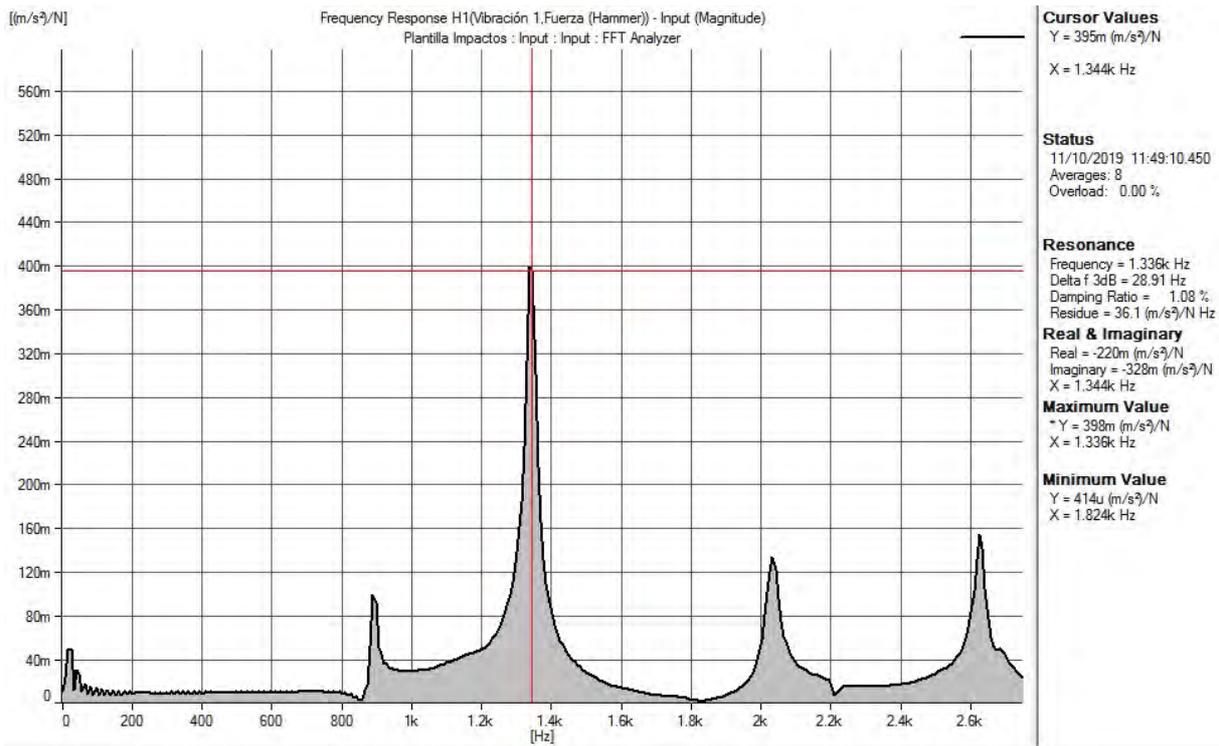
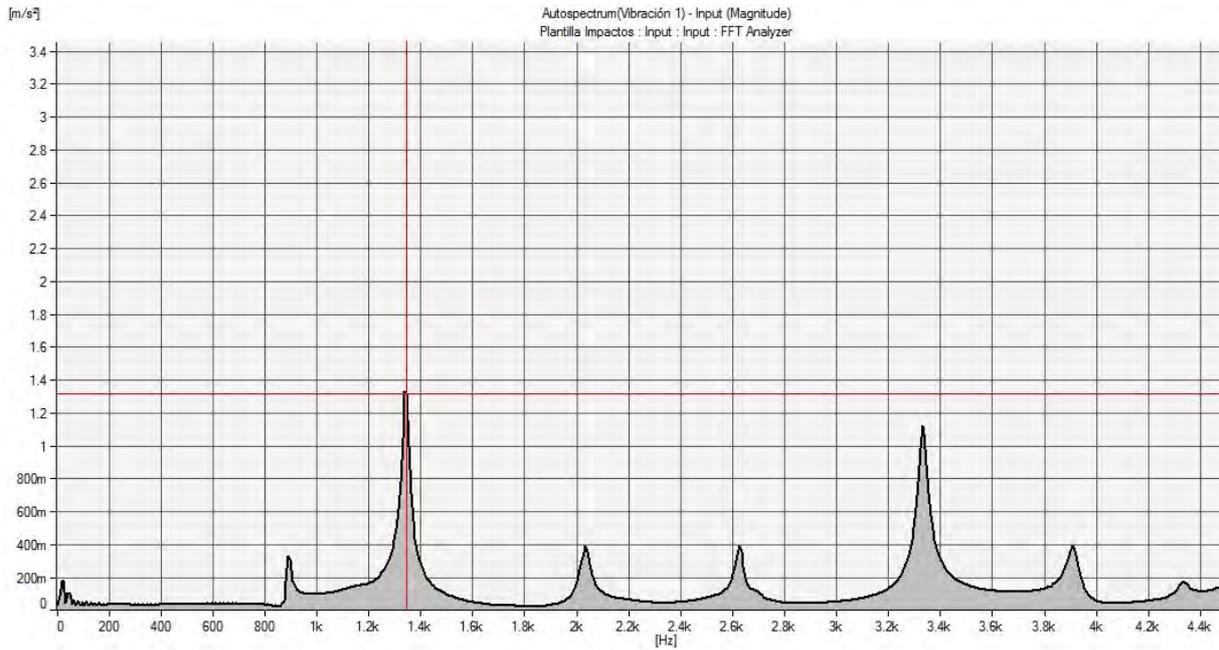
Probeta 9. Modo transversal



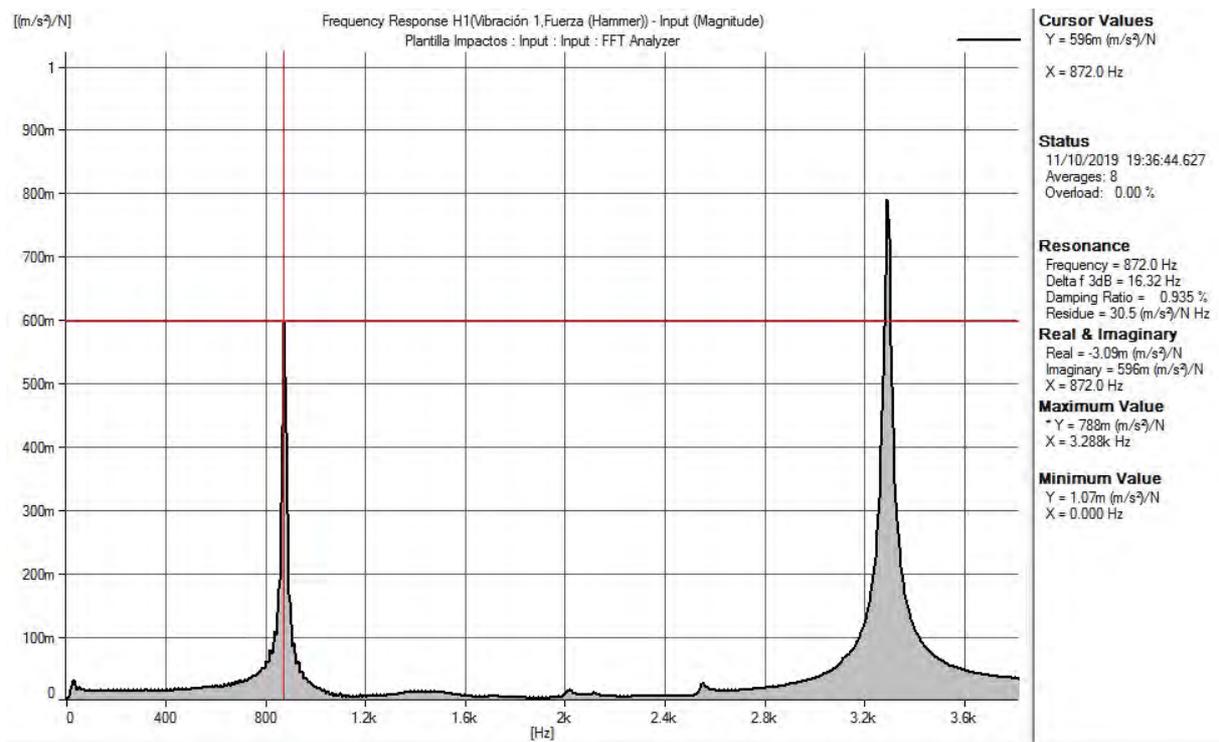
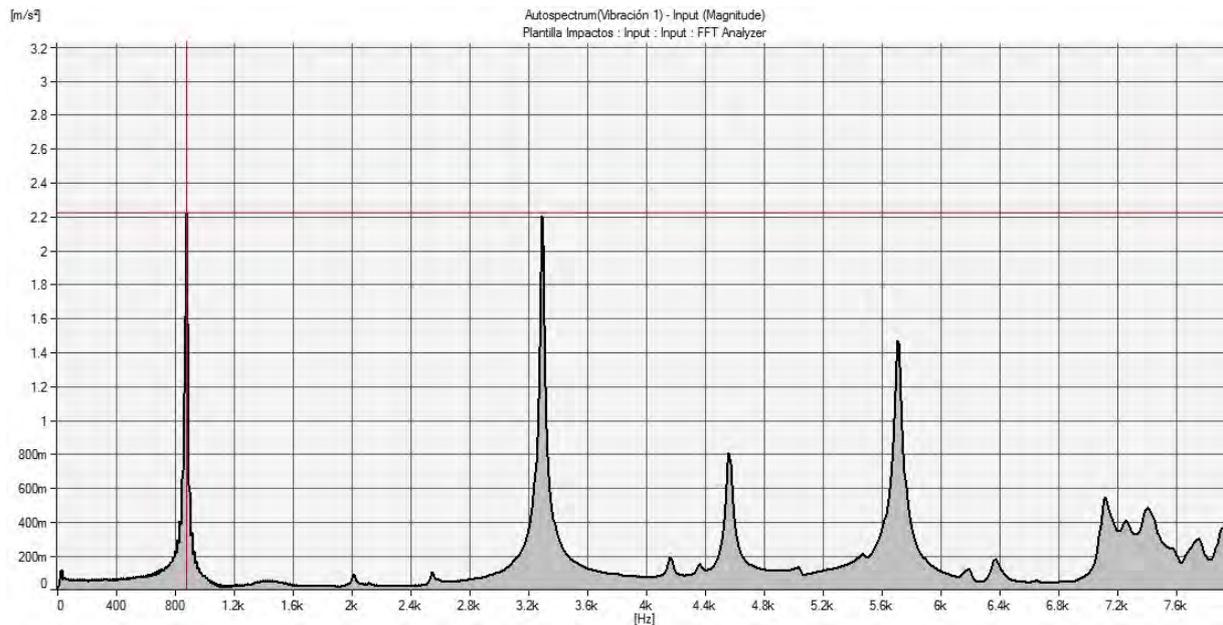
Probeta 9. Modo longitudinal



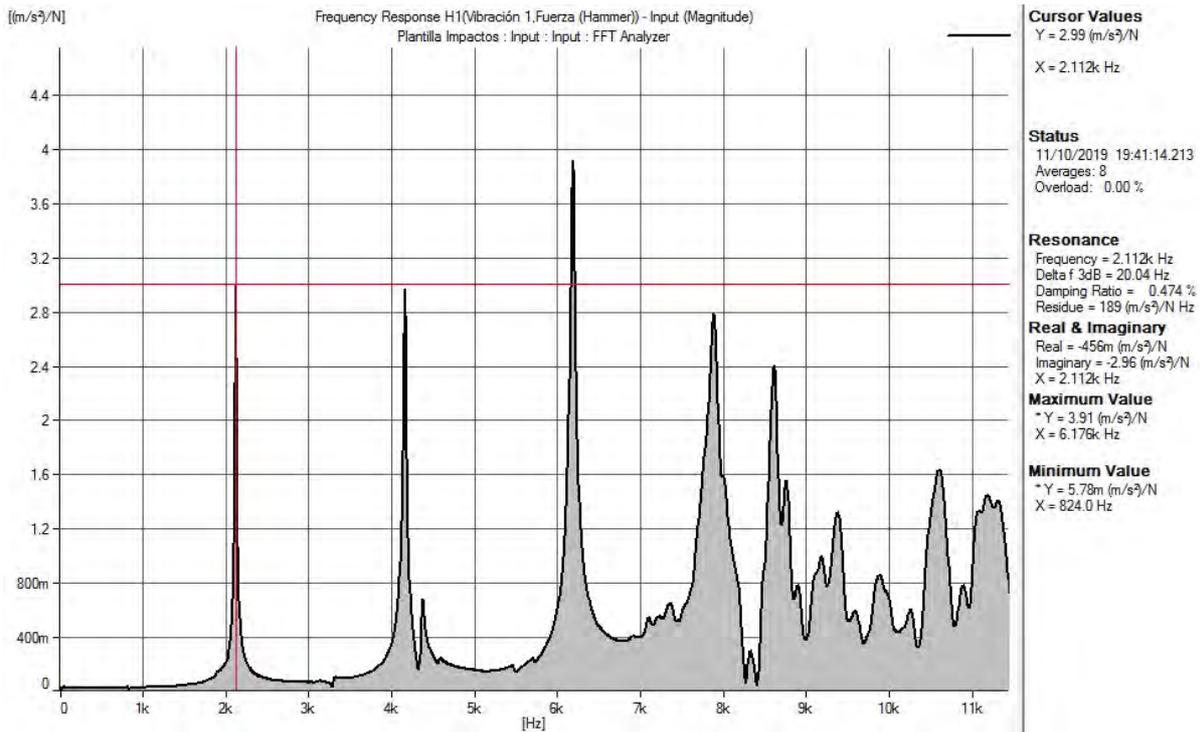
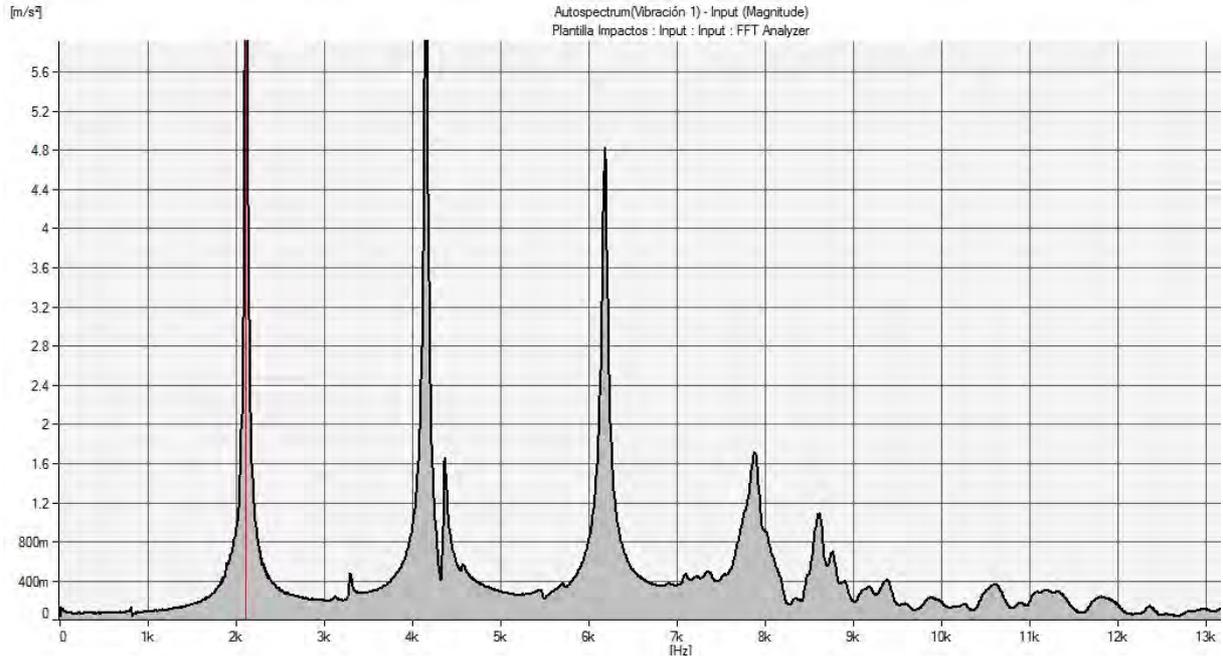
Probeta 9. Modo torsional



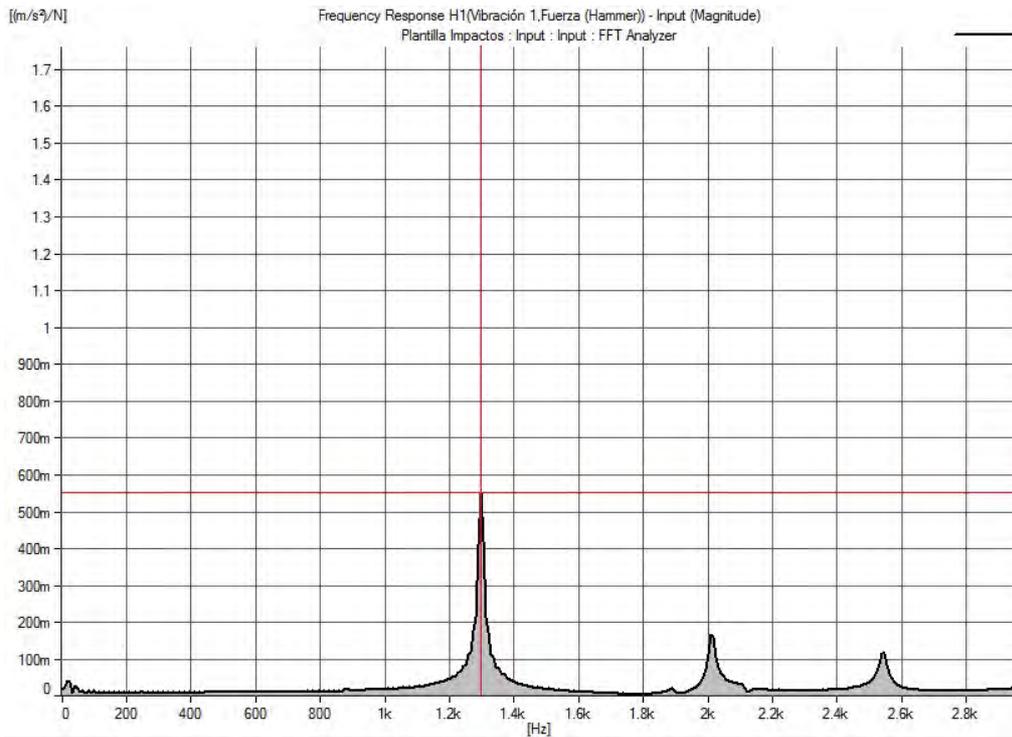
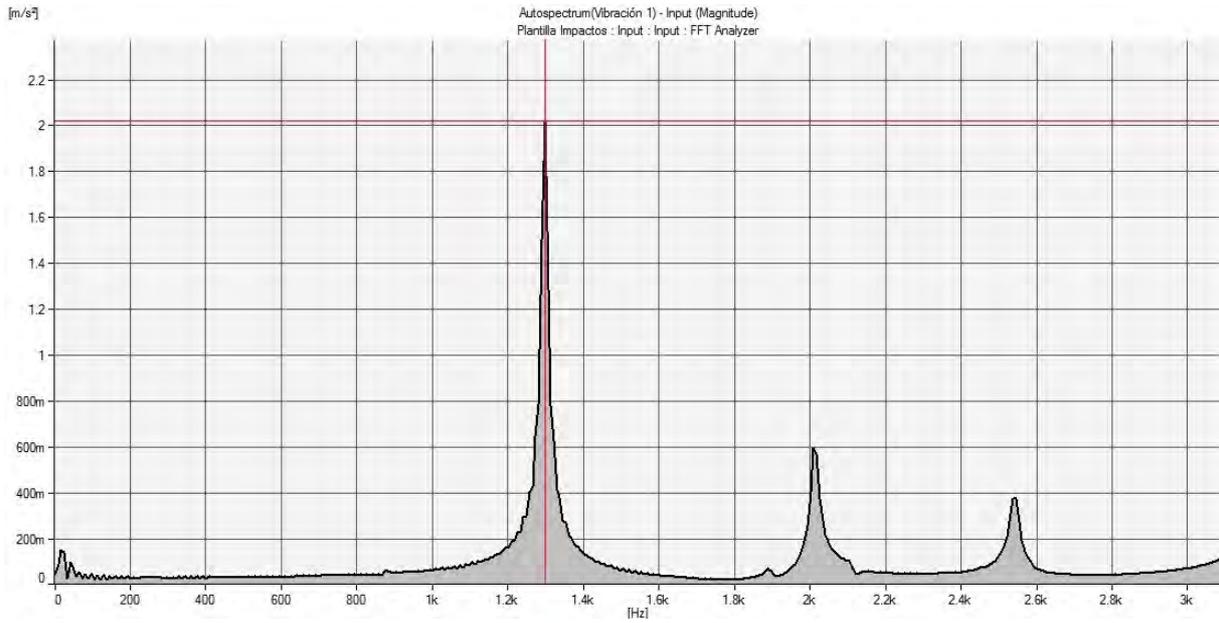
Probeta 10. Modo transversal



Probeta 10. Modo longitudinal



Probeta 10. Modo torsional



Cursor Values
Y = 550m (m/s²)/N
X = 1.296k Hz

Status
11/10/2019 19:45:16.043
Averages: 8
Overload: 0.00 %

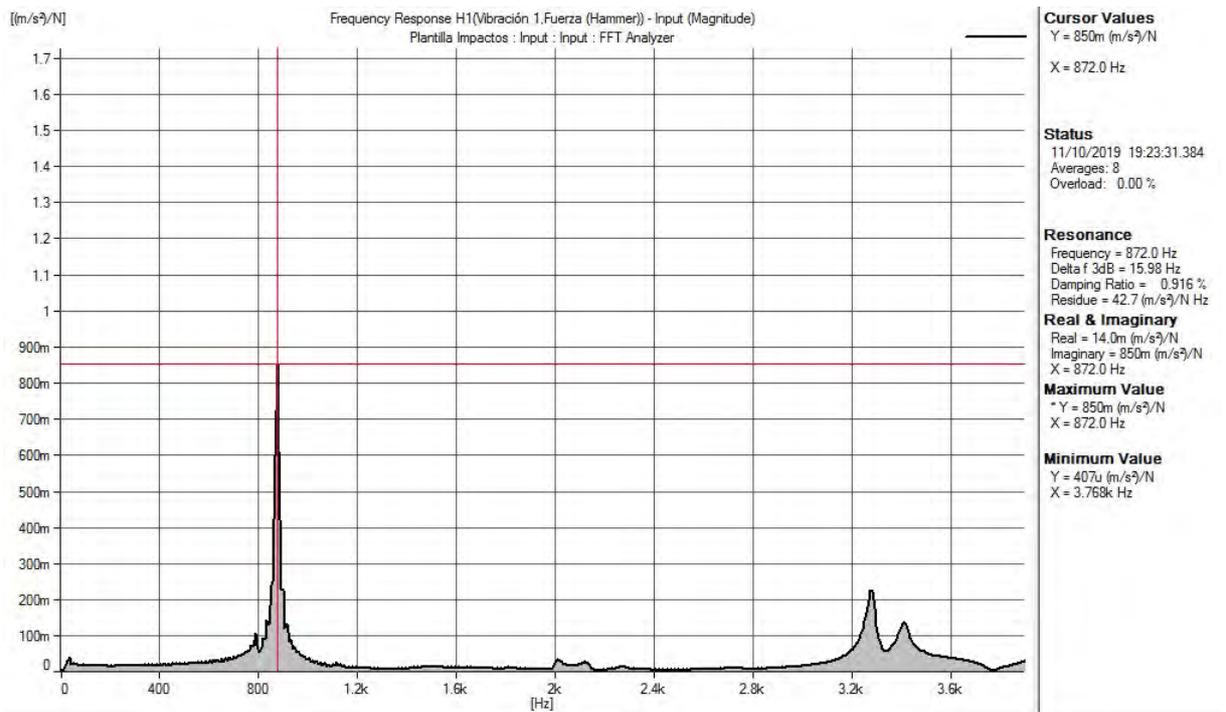
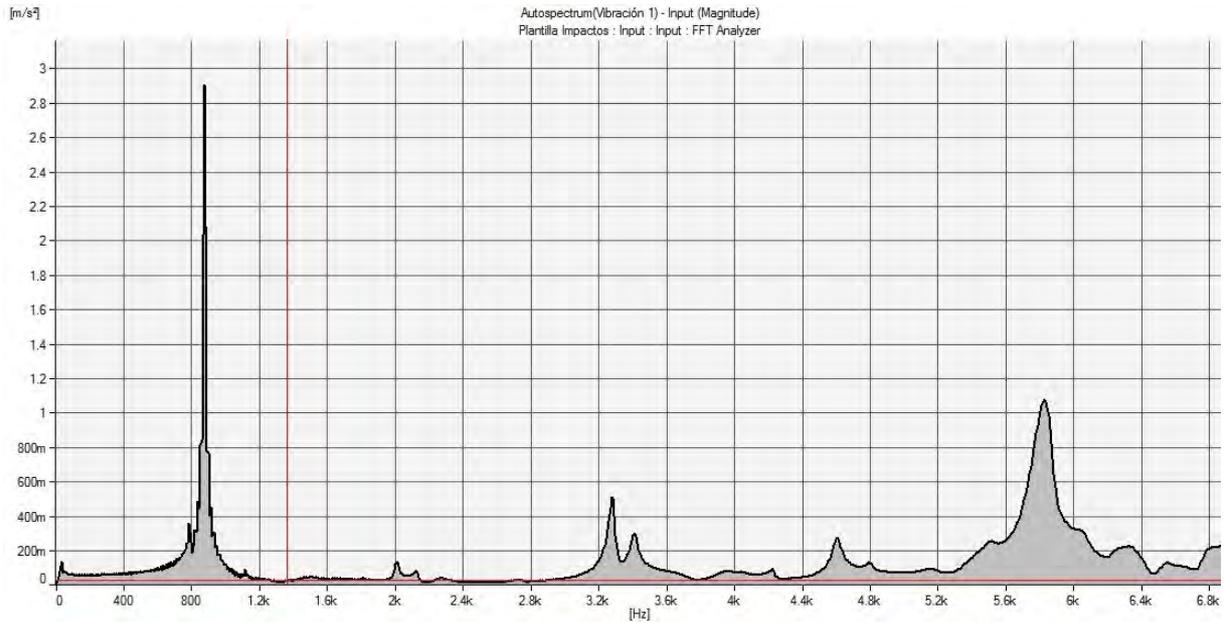
Resonance
Frequency = 1.296k Hz
Delta f 3dB = 17.91 Hz
Damping Ratio = 0.69 %
Residue = 30.9 (m/s²)/N Hz

Real & Imaginary
Real = -17.2m (m/s²)/N
Imaginary = -550m (m/s²)/N
X = 1.296k Hz

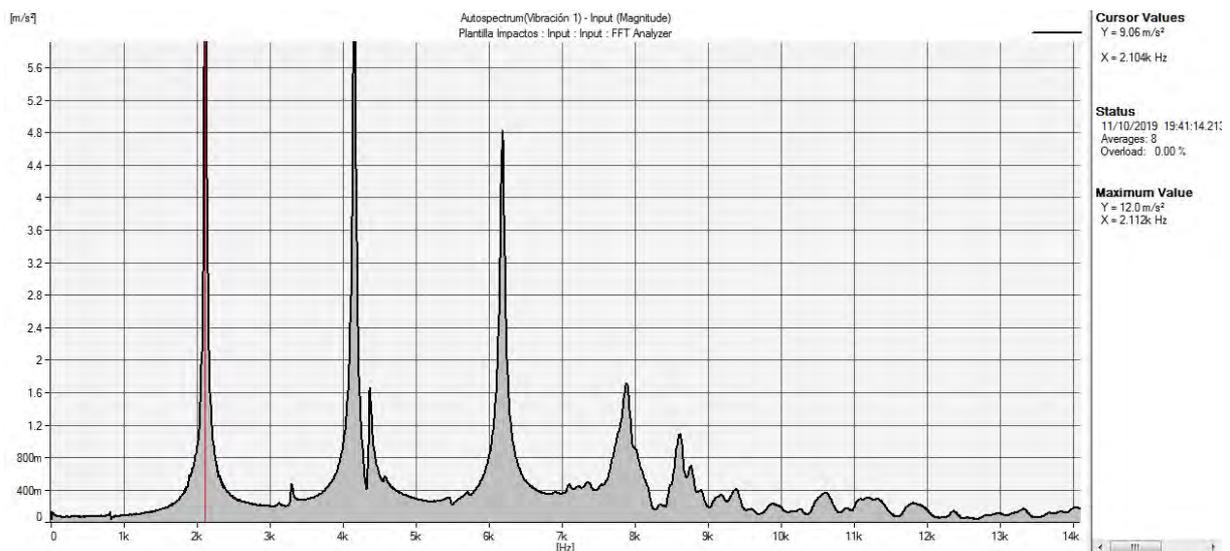
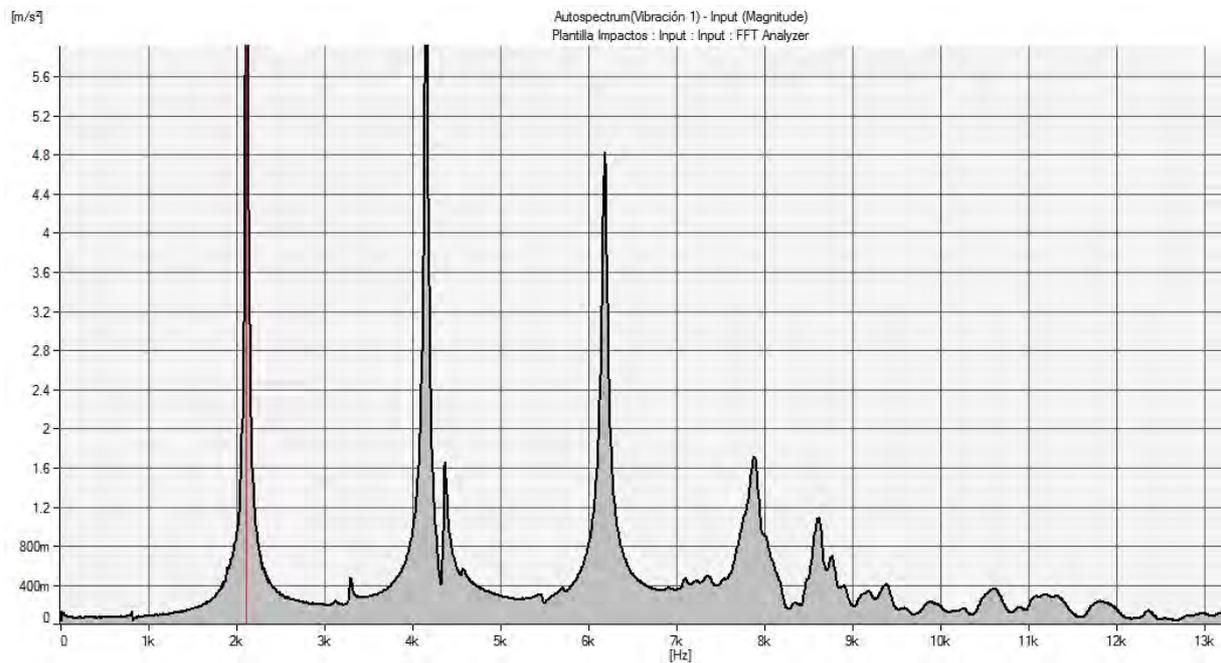
Maximum Value
* Y = 550m (m/s²)/N
X = 1.296k Hz

Minimum Value
* Y = 1.72m (m/s²)/N
X = 1.800k Hz

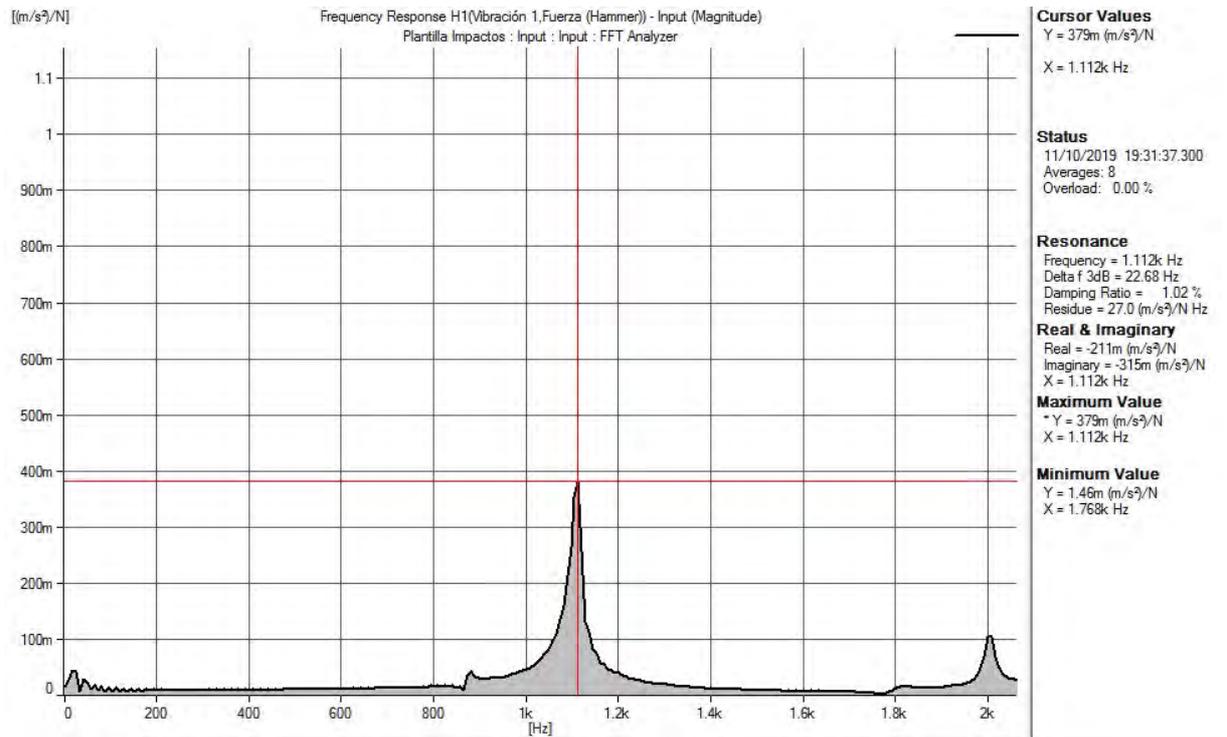
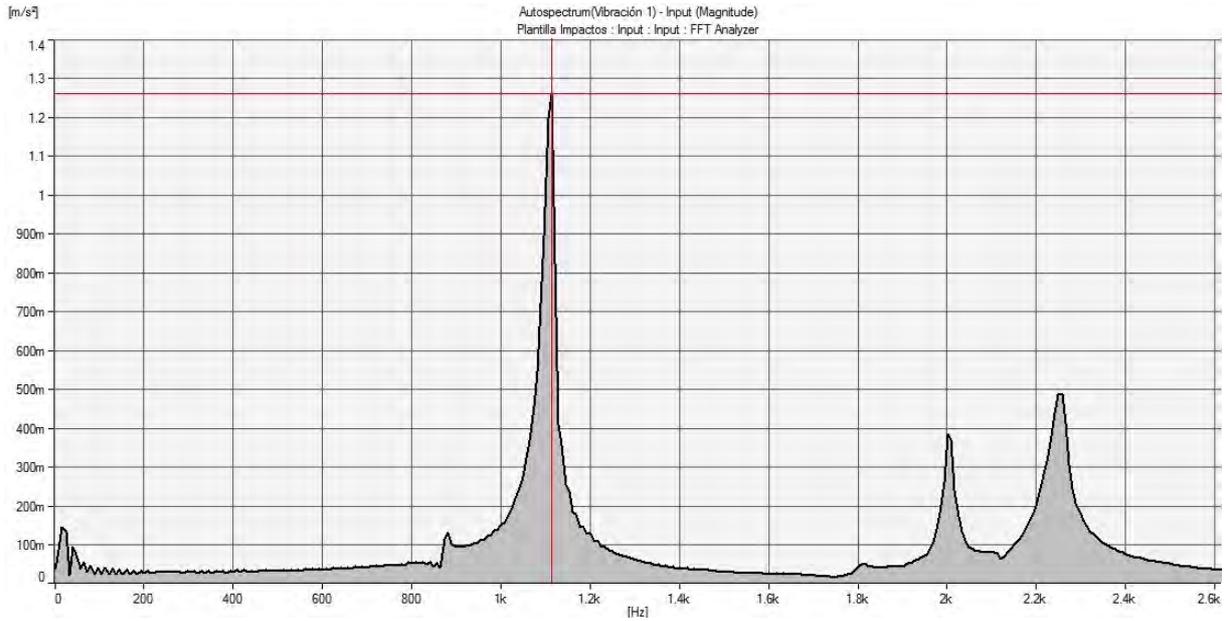
Probeta 11. Modo transversal



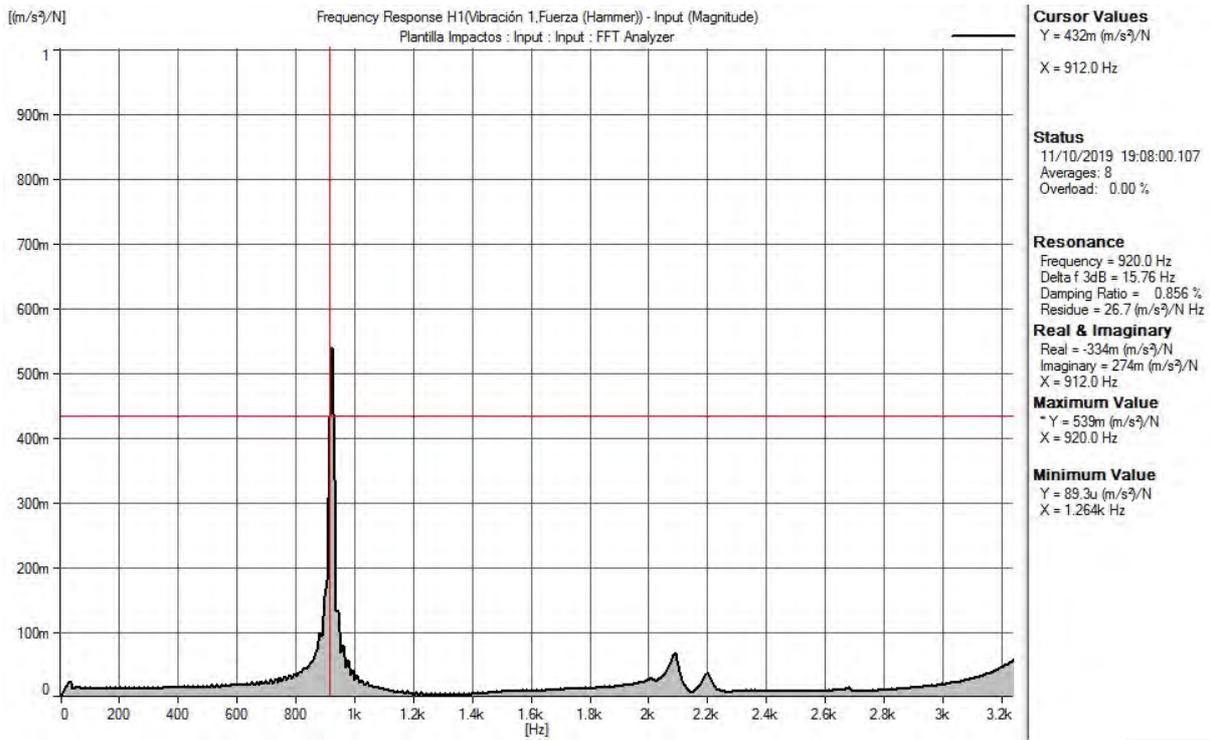
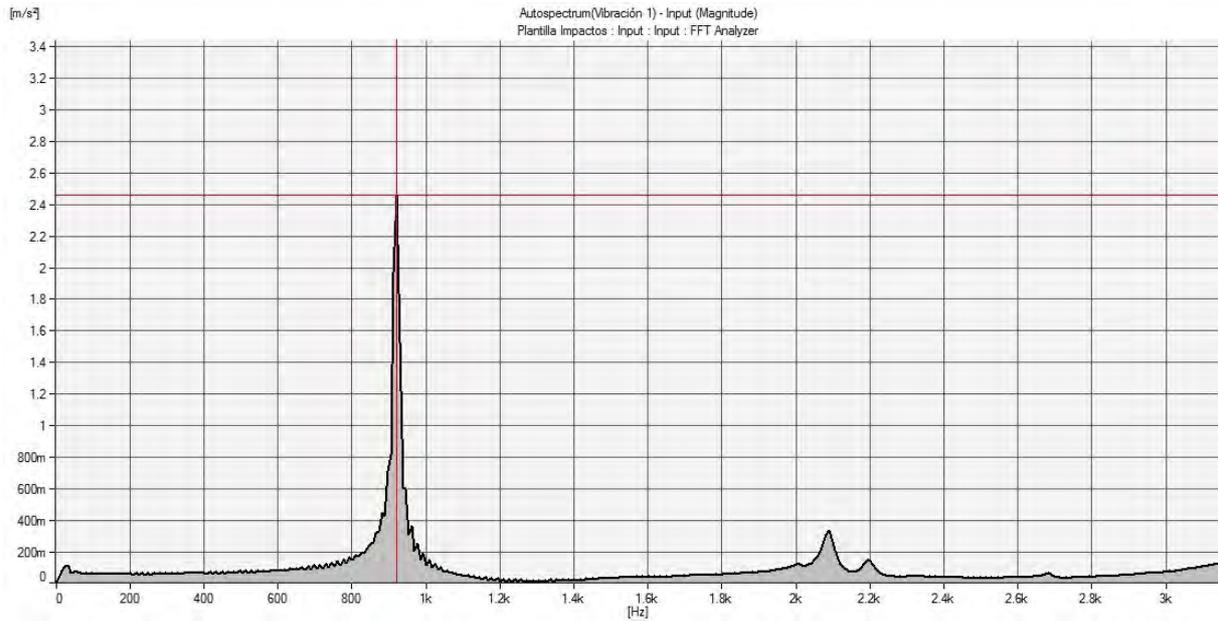
Probeta 11. Modo longitudinal



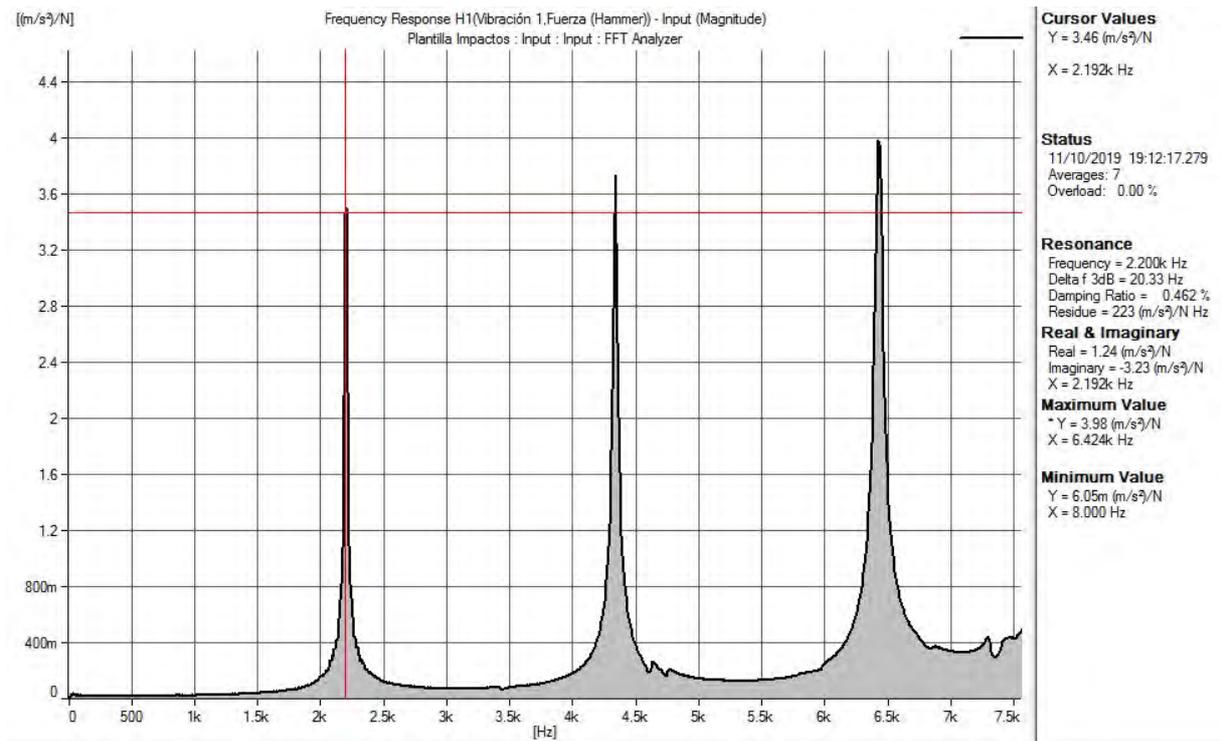
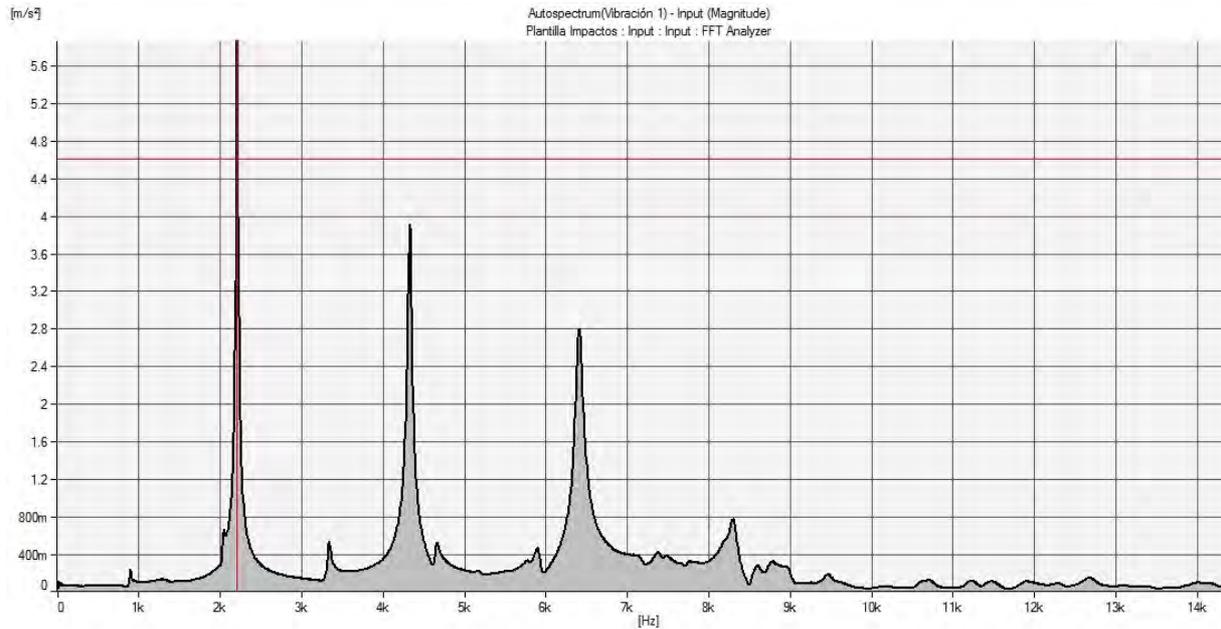
Probeta 11. Modo torsional



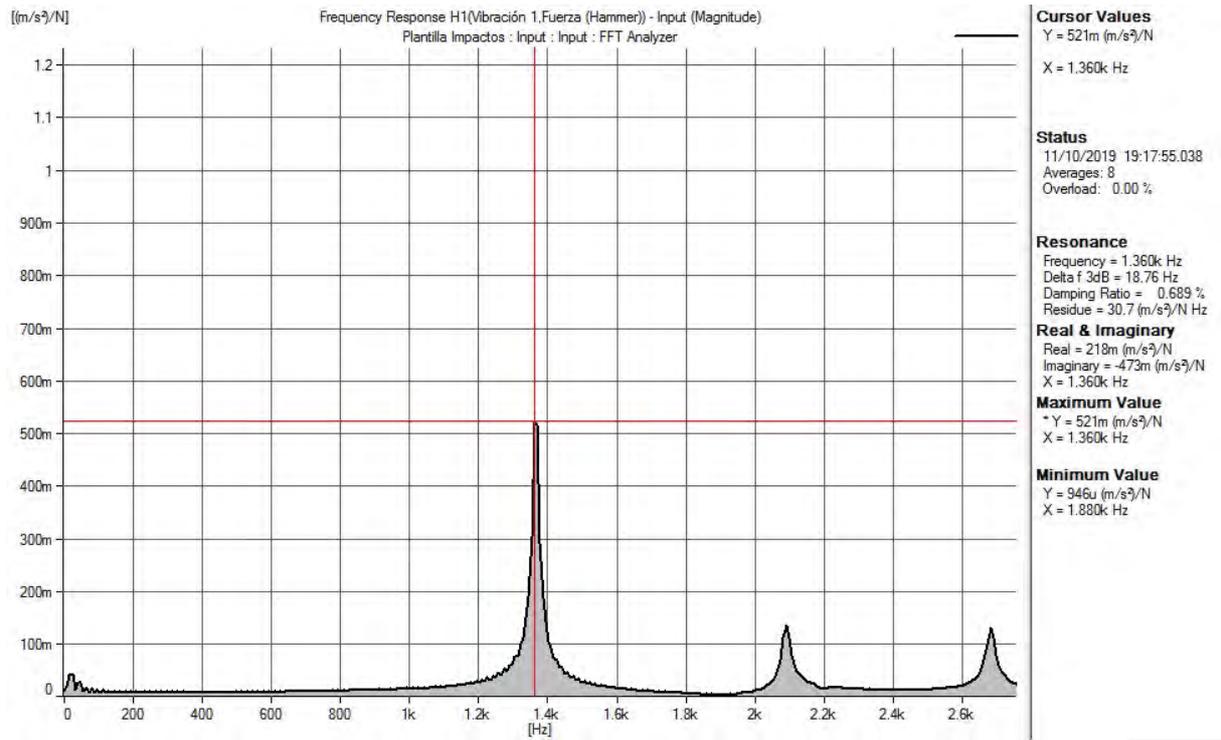
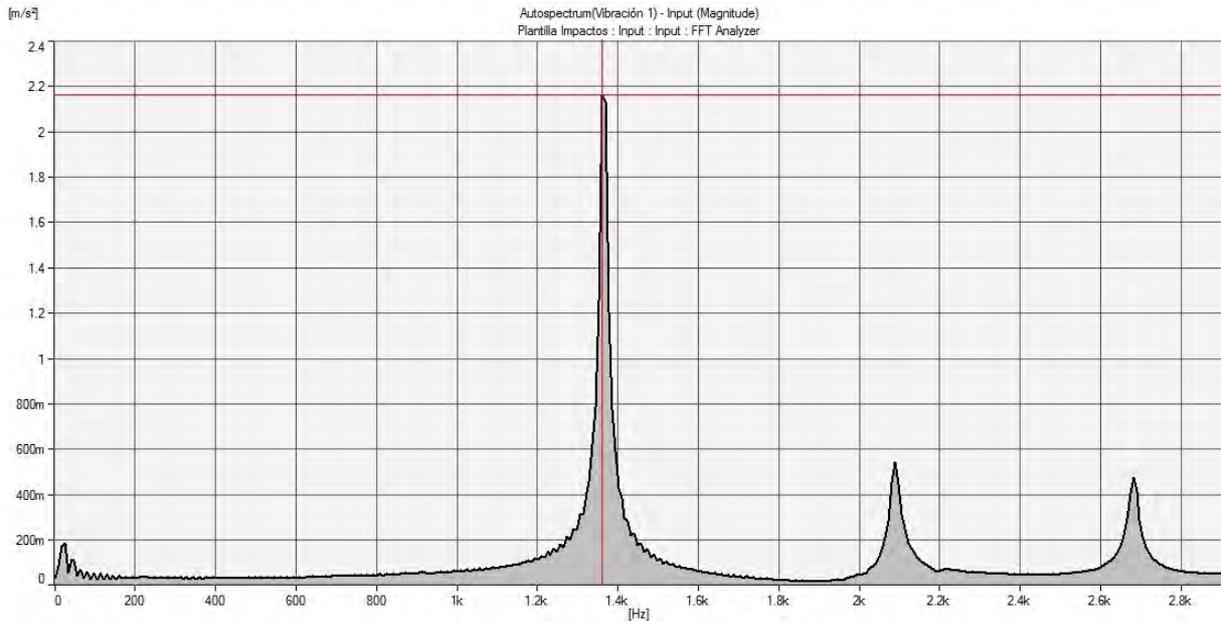
Probeta 12. Modo transversal



Probeta 12. Modo longitudinal



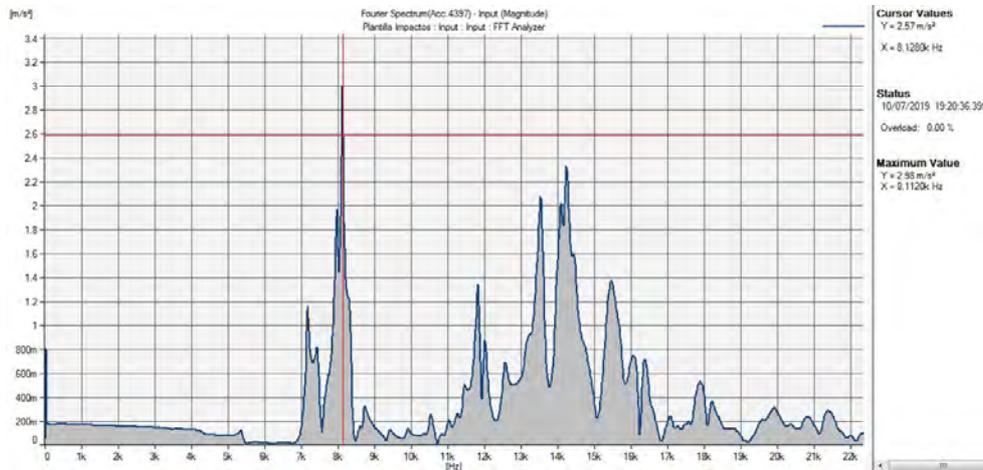
Probeta 12. Modo torsional



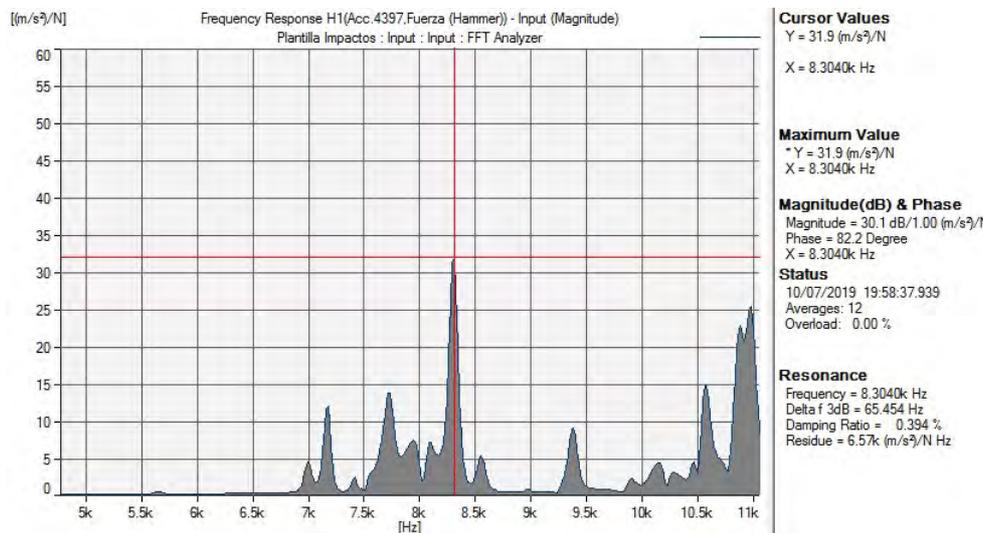
Apéndice E

Resultados de ensayos FFRF sobre probetas cúbicas

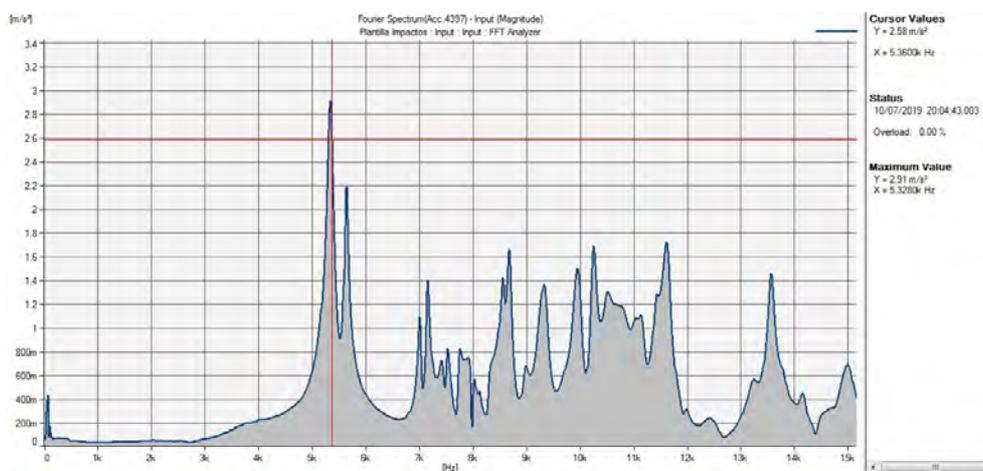
Serie 1. Probeta 1



(a) Modo transversal

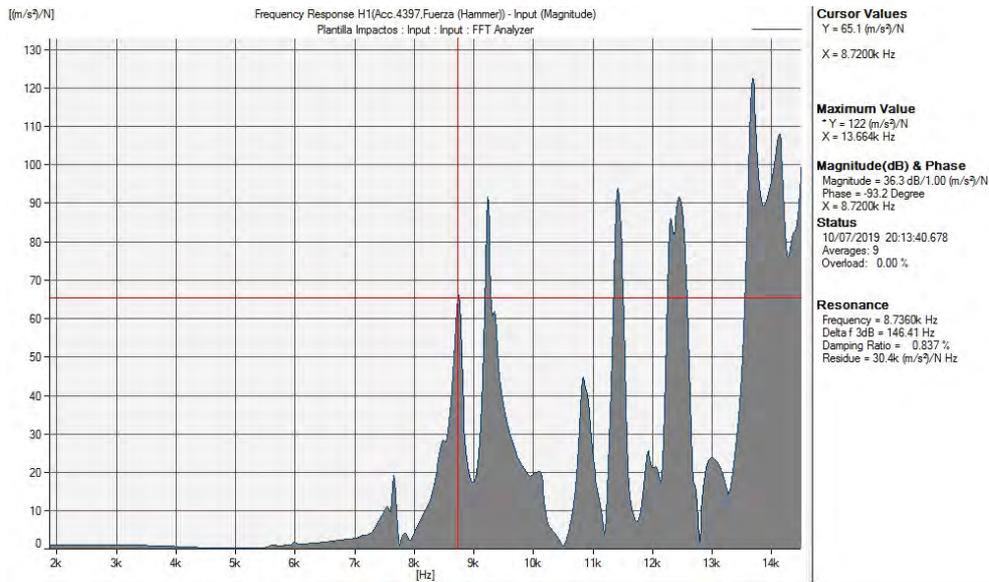


(b) Modo longitudinal

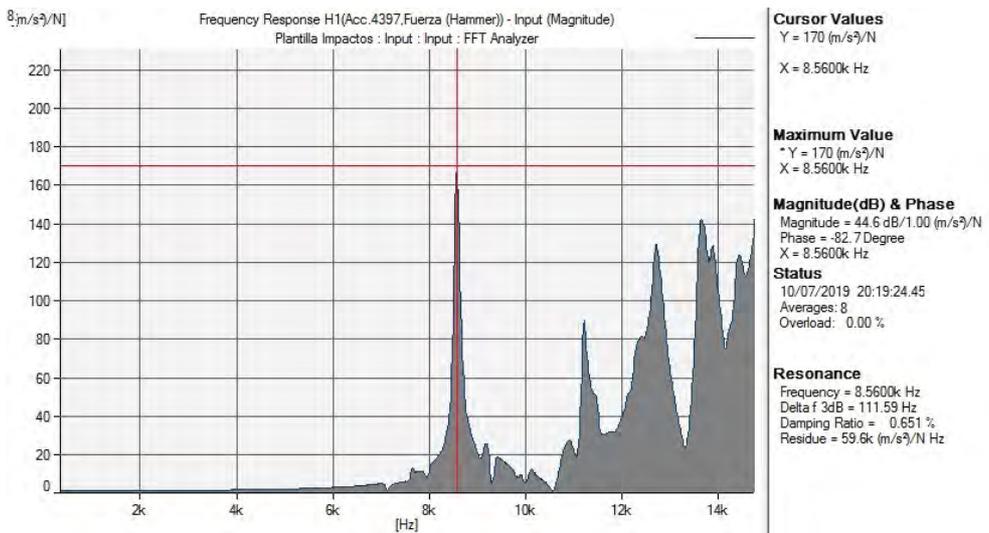


(c) Modo torsional

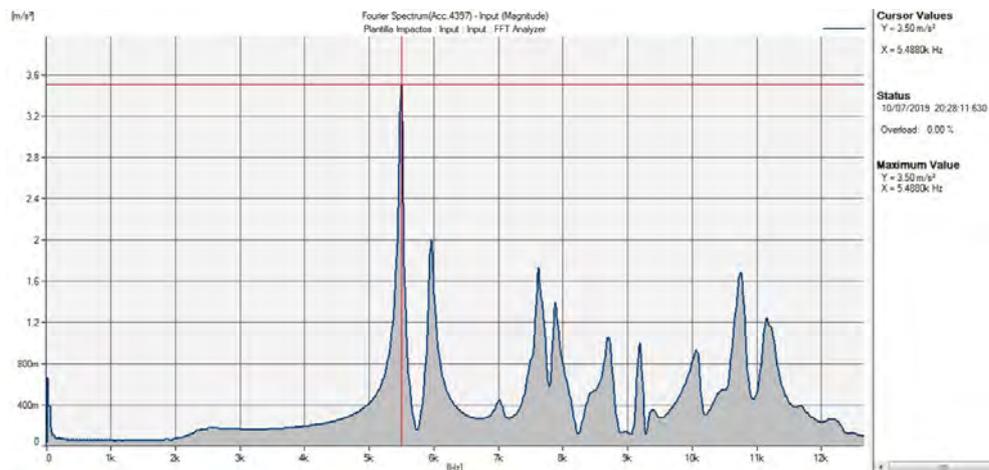
Serie 1. Probeta 2



(d) Modo transversal

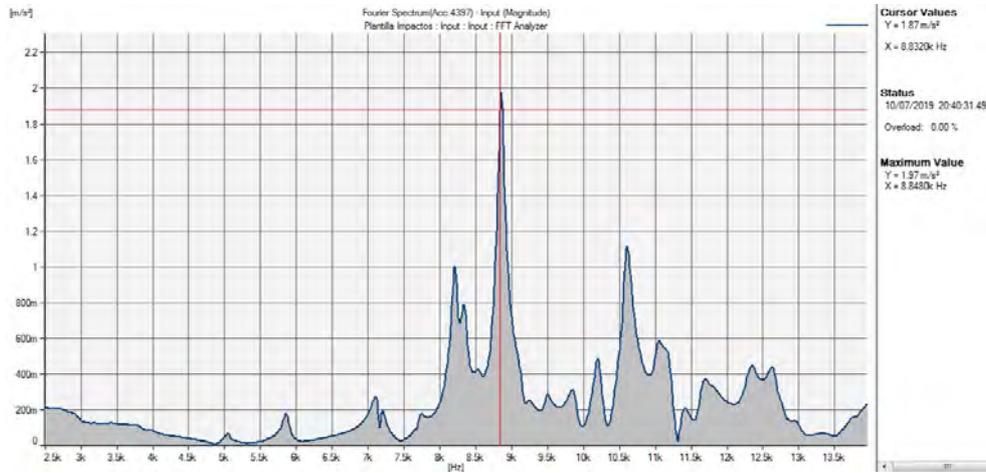


(e) Modo longitudinal

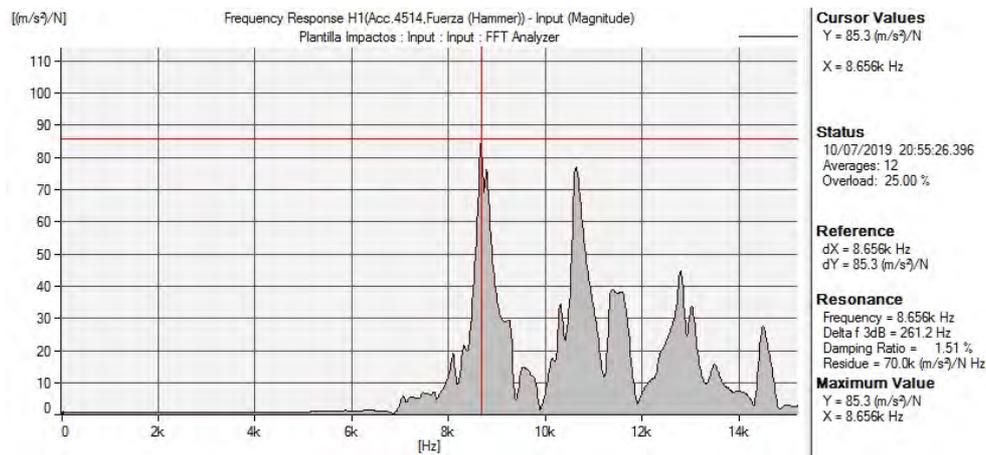


(f) Modo torsional

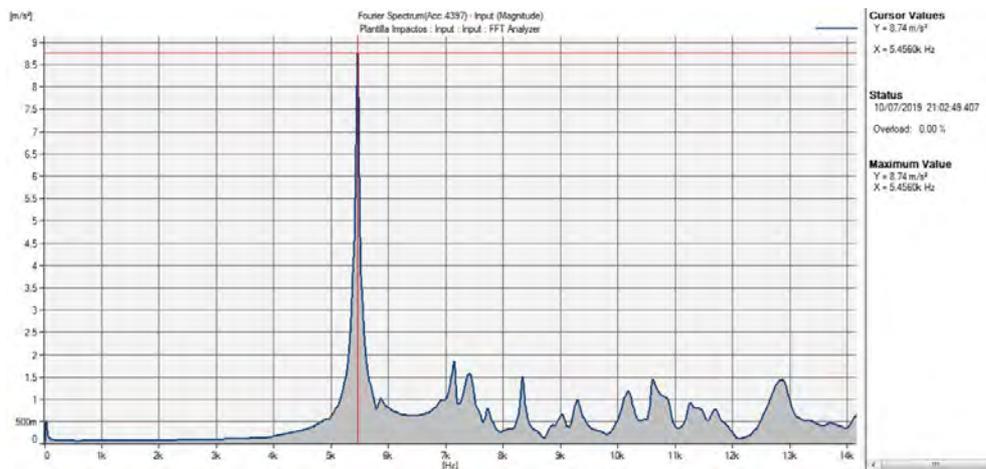
Serie 1. Probeta 3



(g) Modo transversal

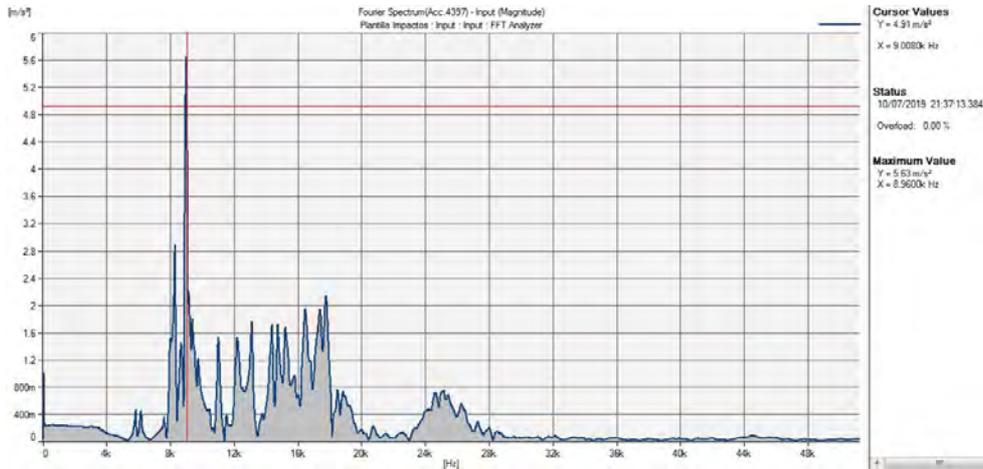


(h) Modo longitudinal

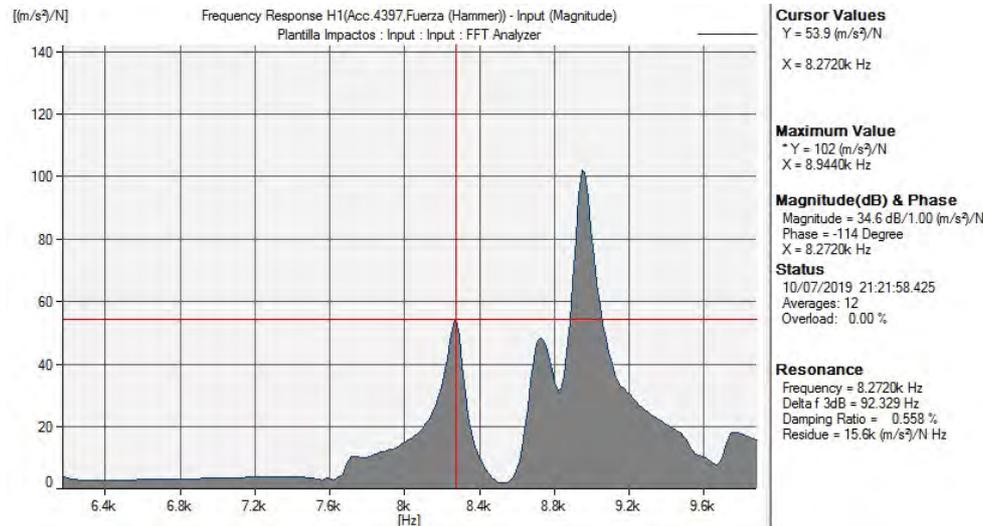


(i) Modo torsional

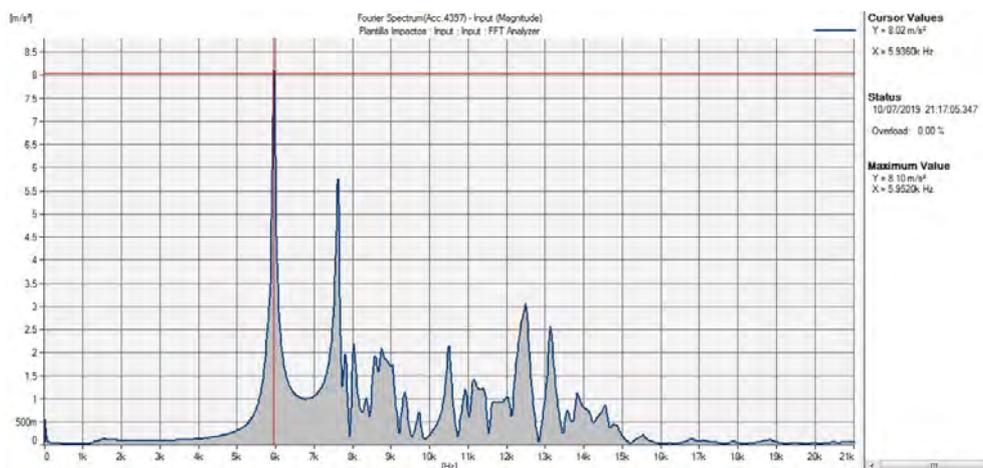
Serie 1. Probeta 4



(j) Modo transversal

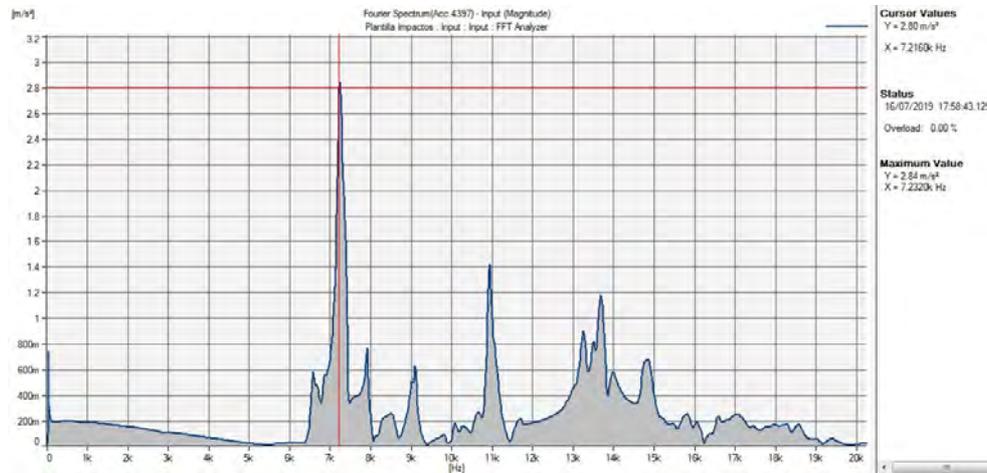


(k) Modo longitudinal

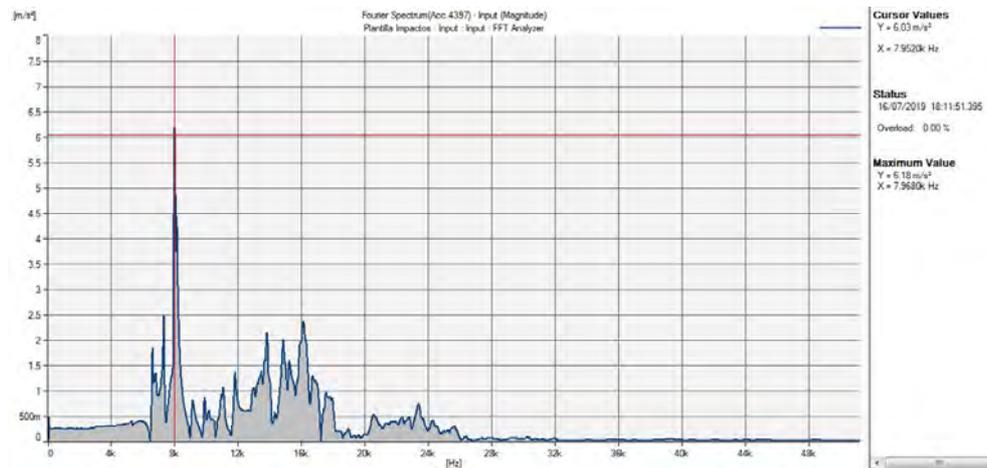


(l) Modo torsional

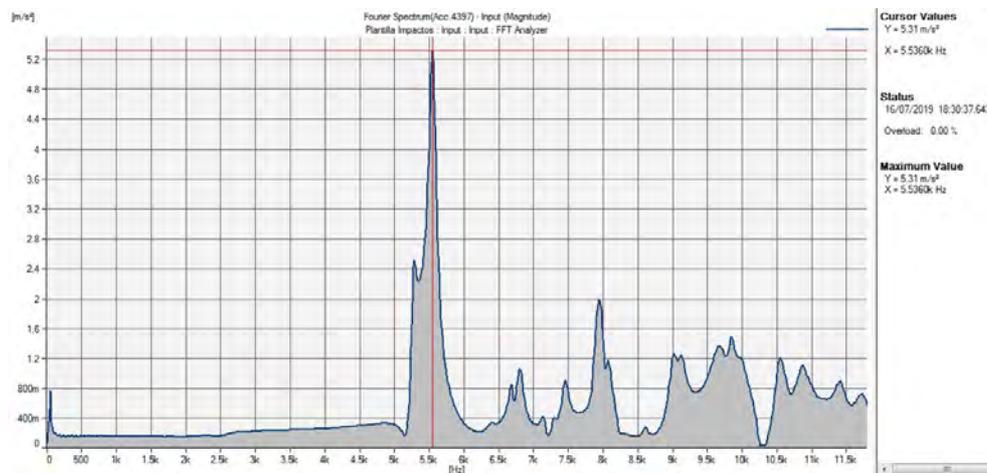
Serie 2. Probeta 1



(m) Modo transversal

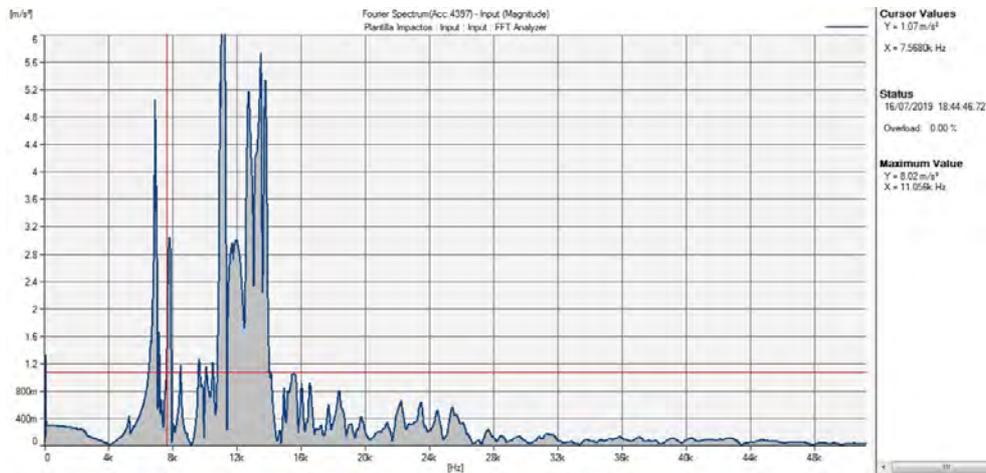


(n) Modo longitudinal

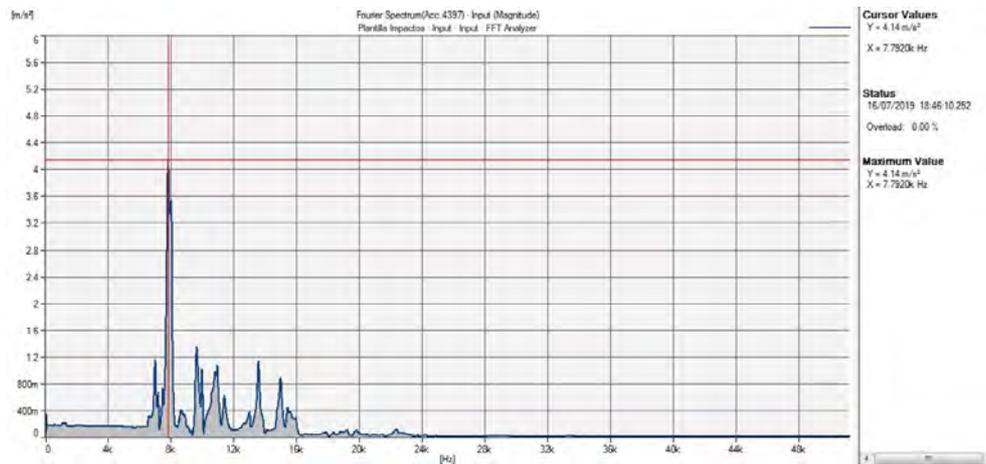


(ñ) Modo torsional

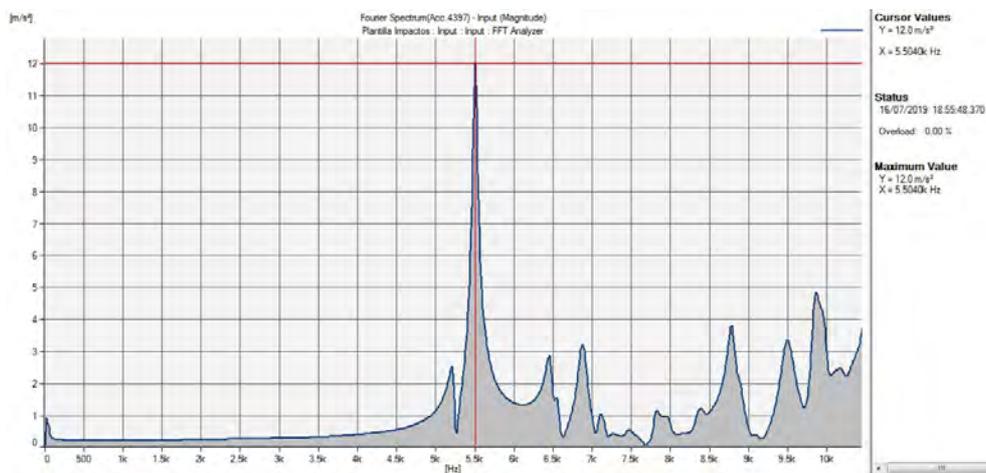
Serie 2. Probeta 2



(o) Modo transversal

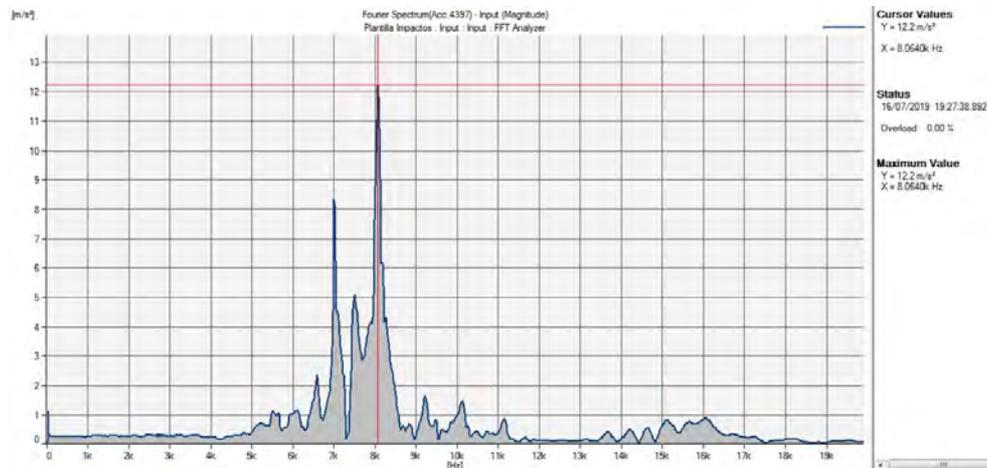


(p) Modo longitudinal

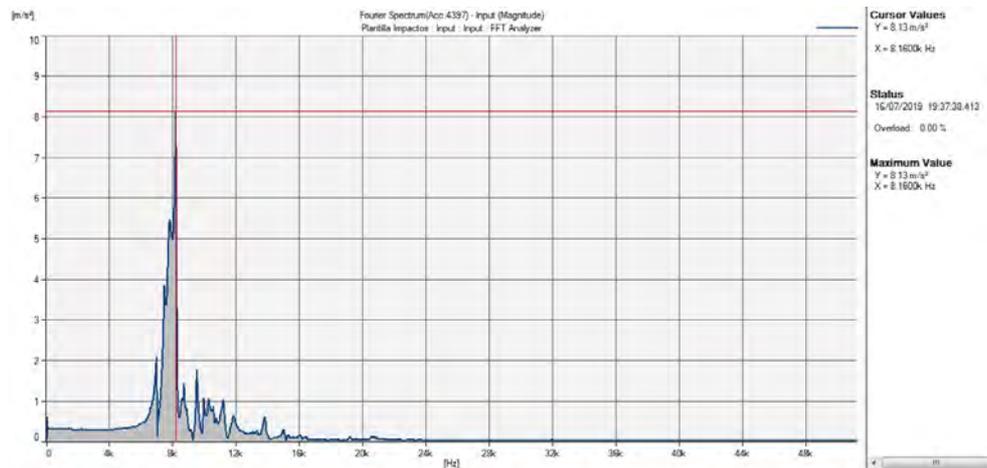


(q) Modo torsional

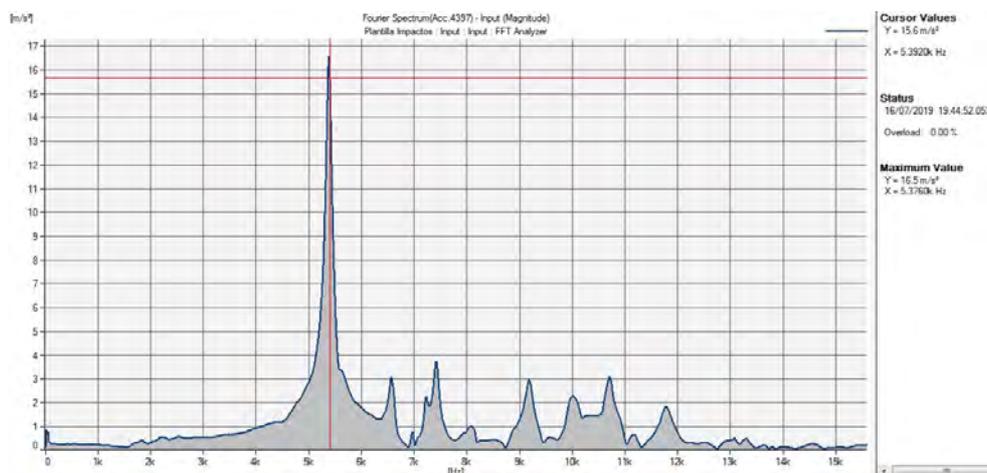
Serie 2. Probeta 3



(r) Modo transversal

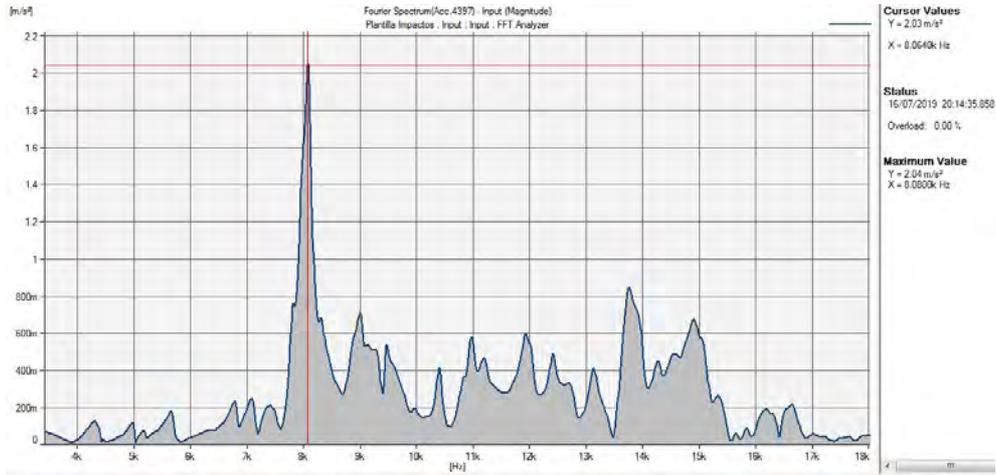


(s) Modo longitudinal

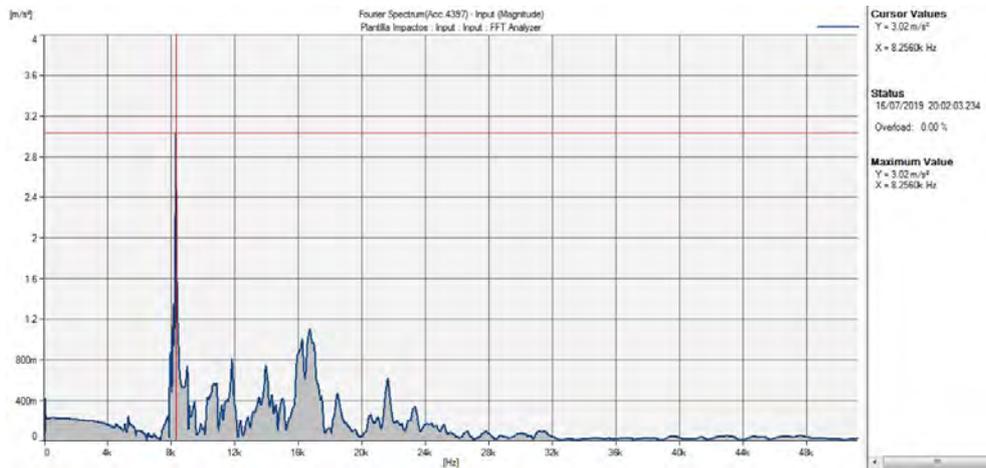


(t) Modo torsional

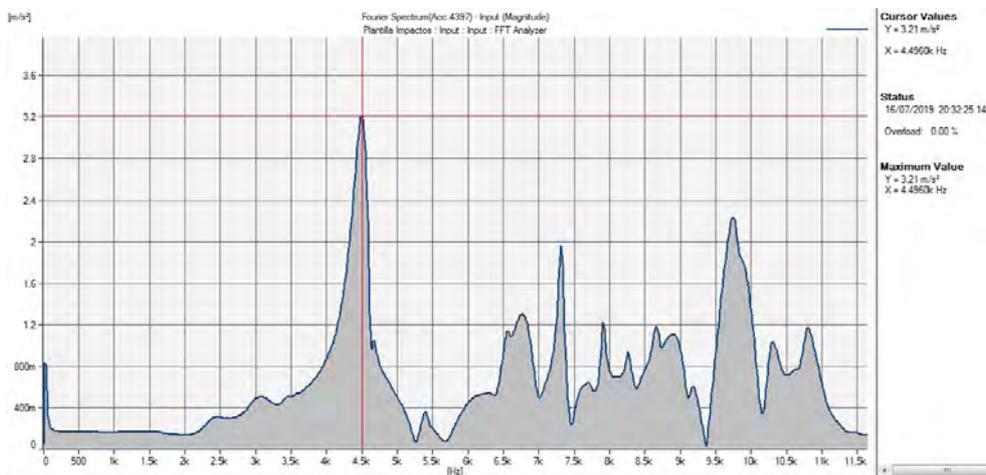
Serie 2. Probeta 4



(u) Modo transversal



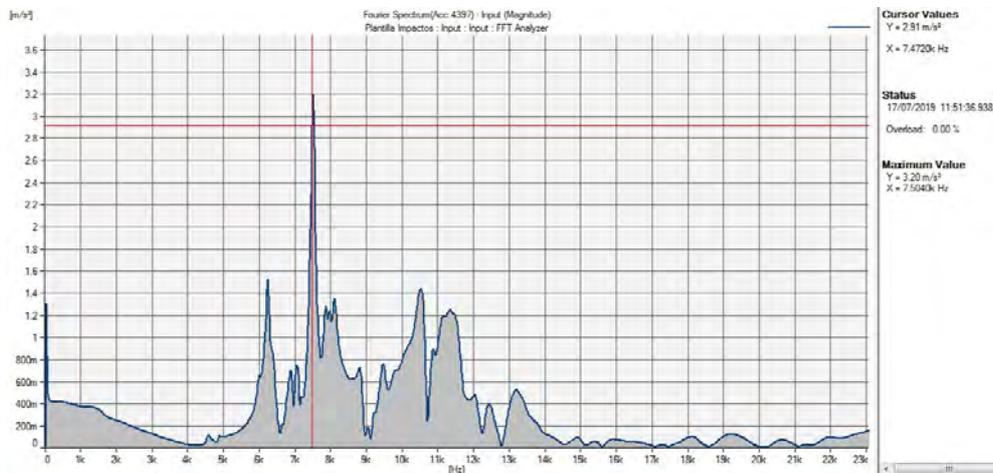
(v) Modo longitudinal



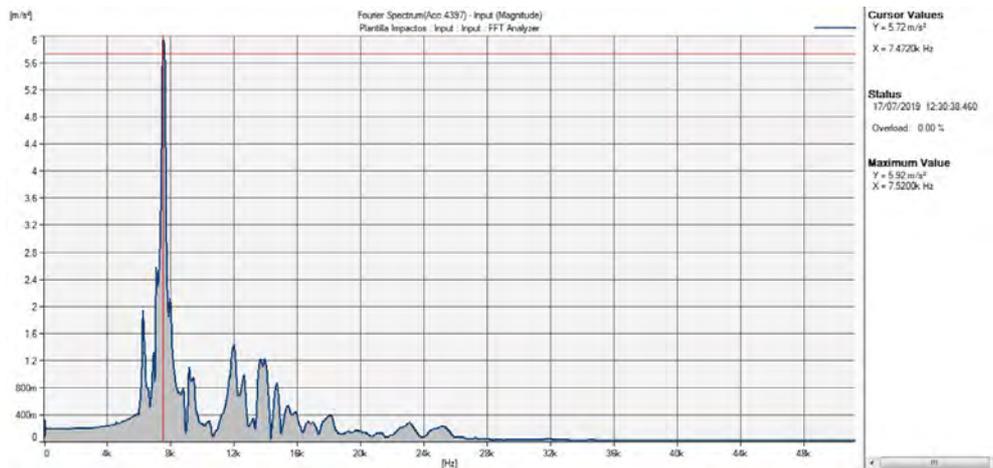
(w) Modo torsional

Figura E.1

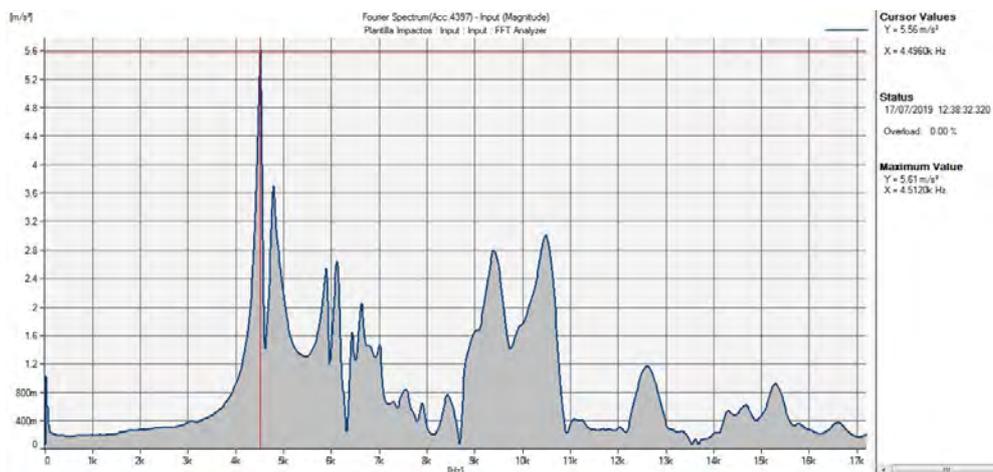
Serie 3. Probeta 1



(a) Modo transversal

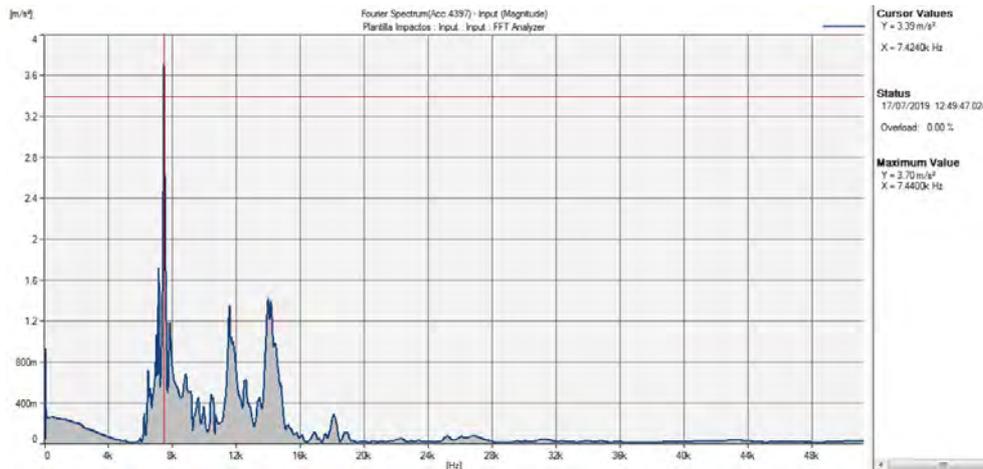


(b) Modo longitudinal

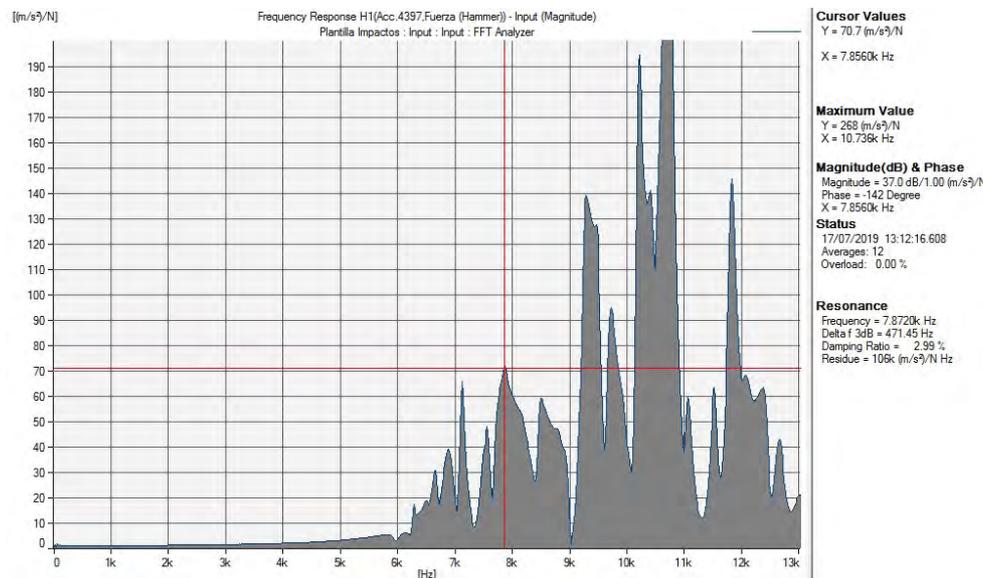


(c) Modo torsional

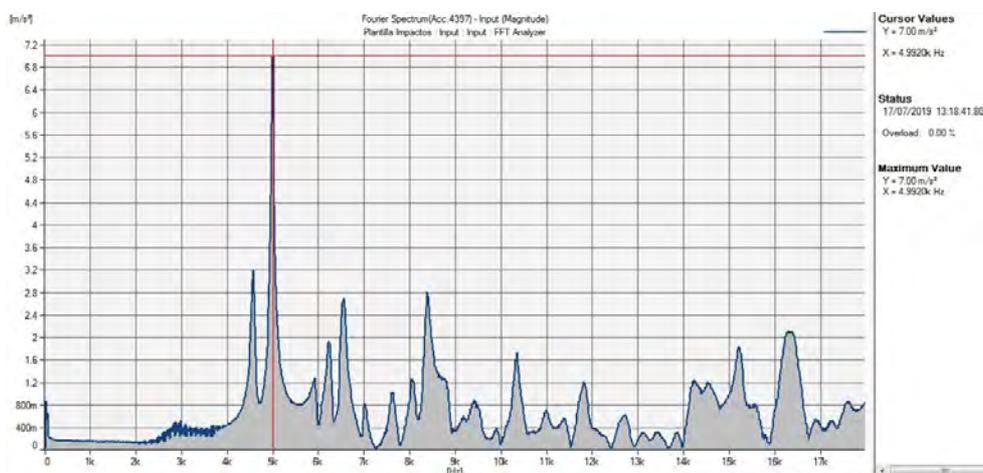
Serie 3. Probeta 2



(d) Modo transversal

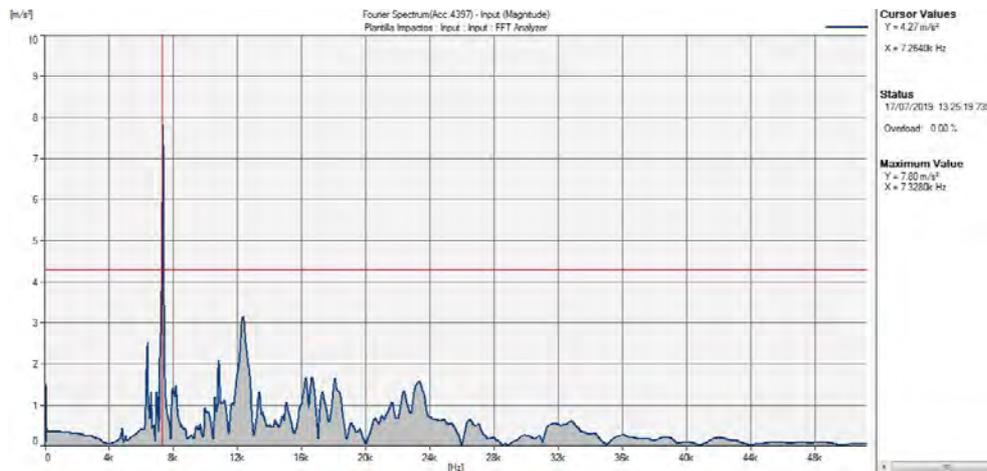


(e) Modo longitudinal

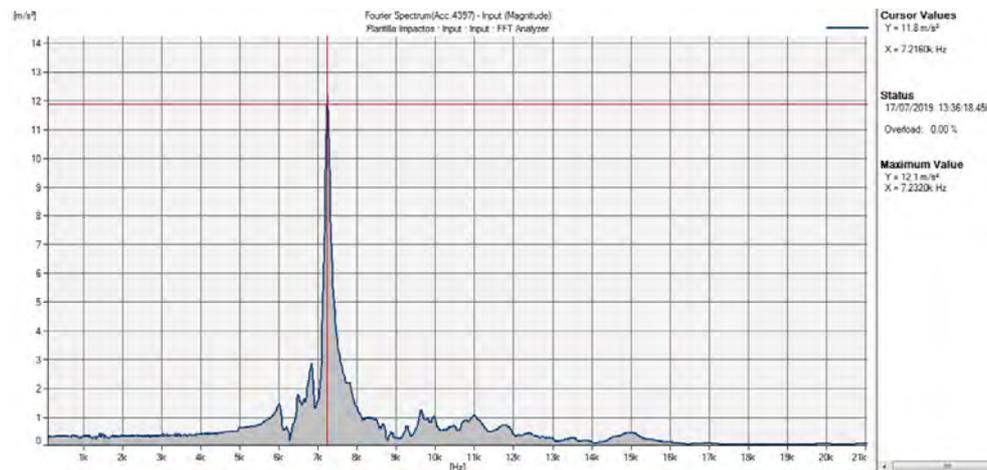


(f) Modo torsional

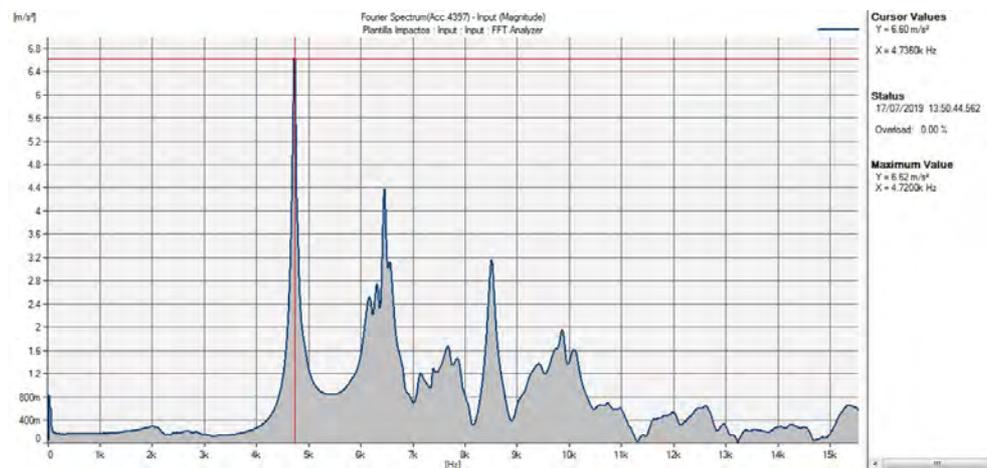
Serie 3. Probeta 3



(g) Modo transversal

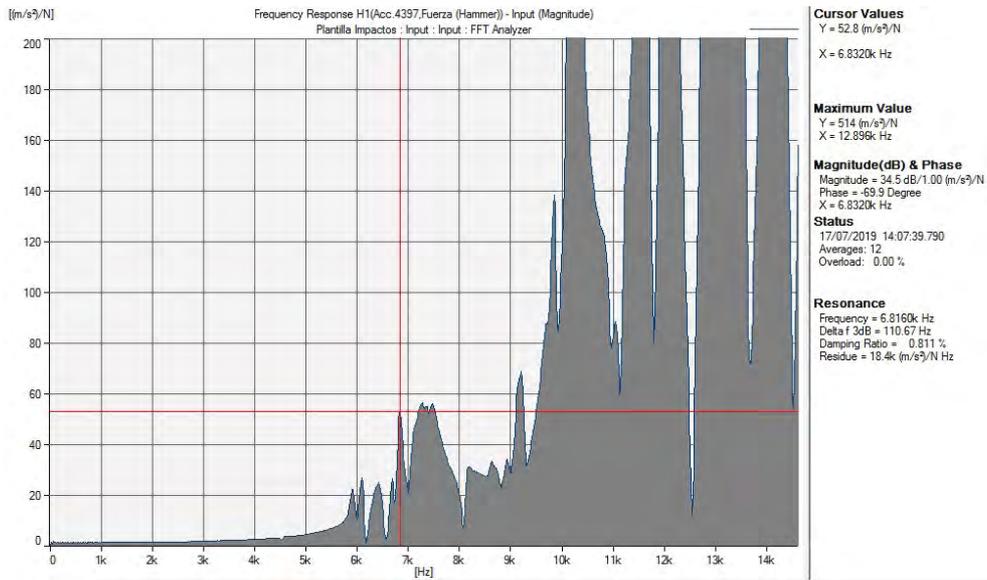


(h) Modo longitudinal

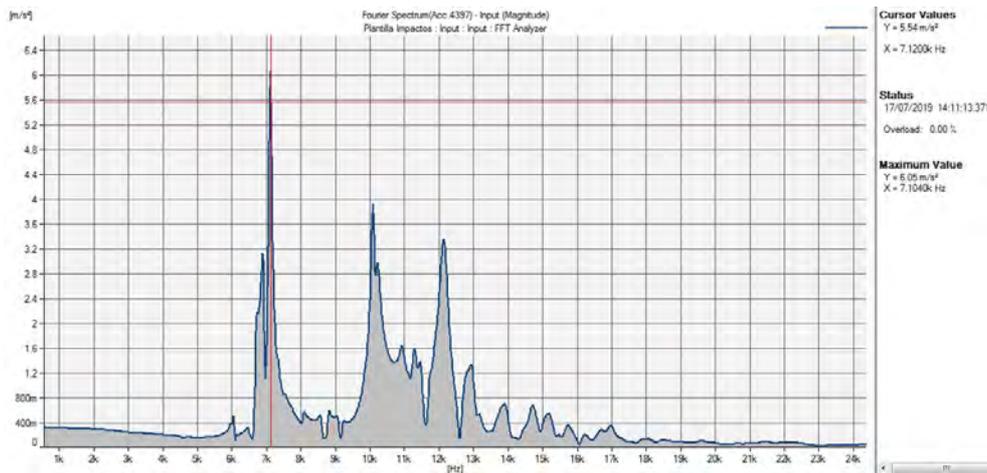


(i) Modo torsional

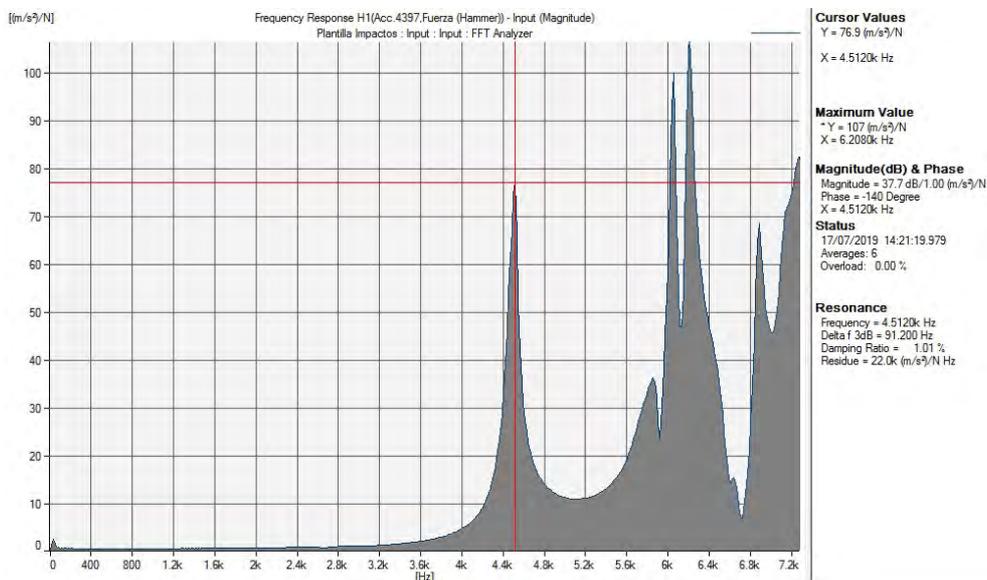
Serie 3. Probeta 4



(j) Modo transversal

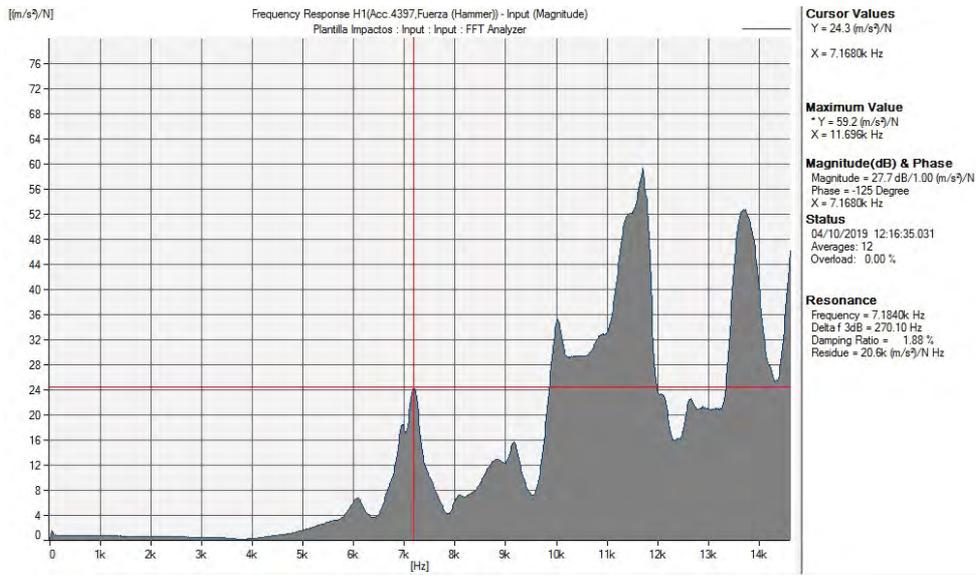


(k) Modo longitudinal

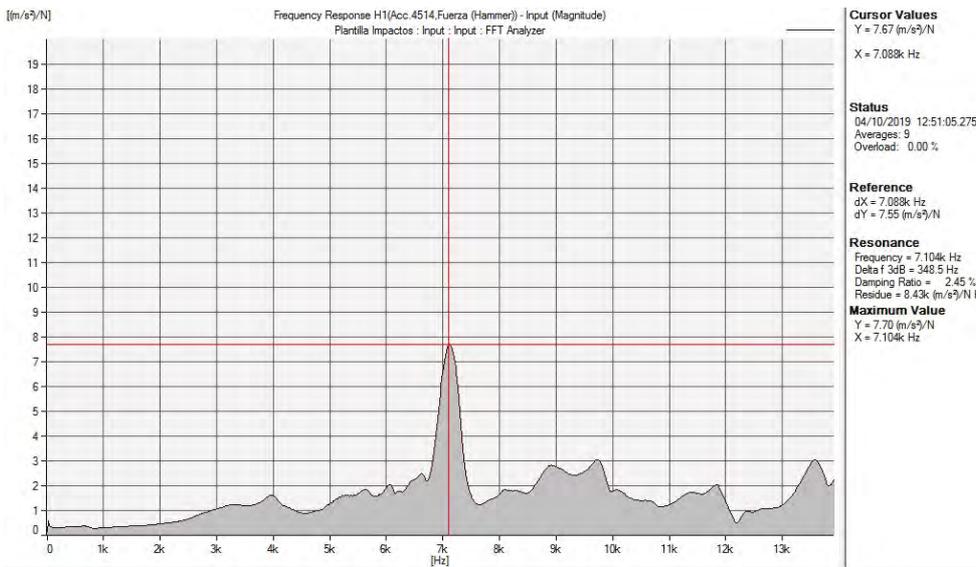


(l) Modo torsional

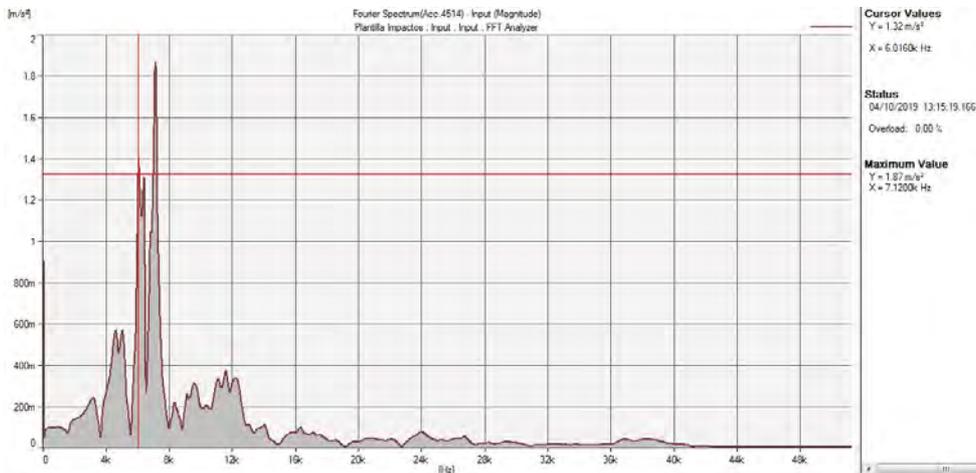
Serie 4. Probeta 1



(m) Modo transversal

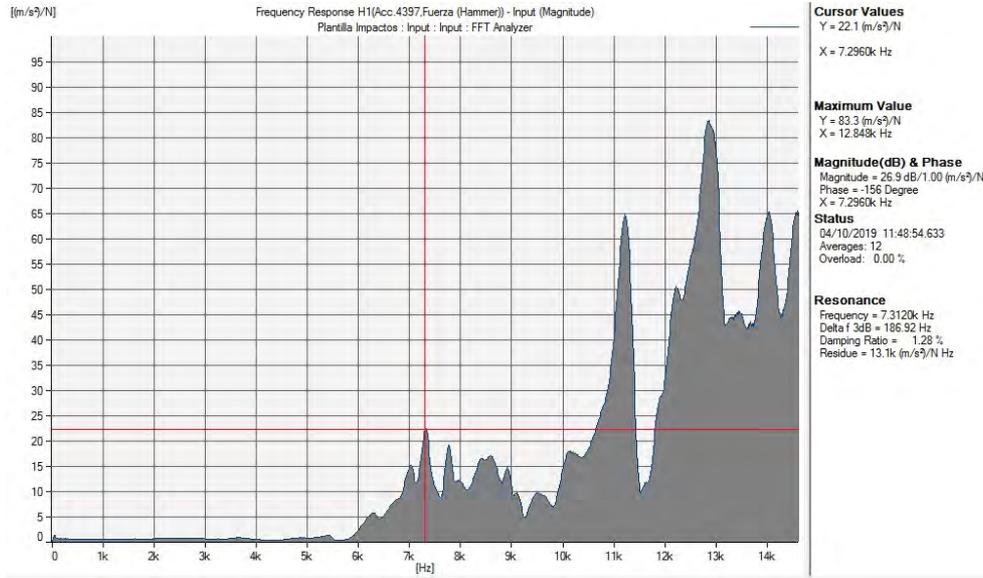


(n) Modo longitudinal

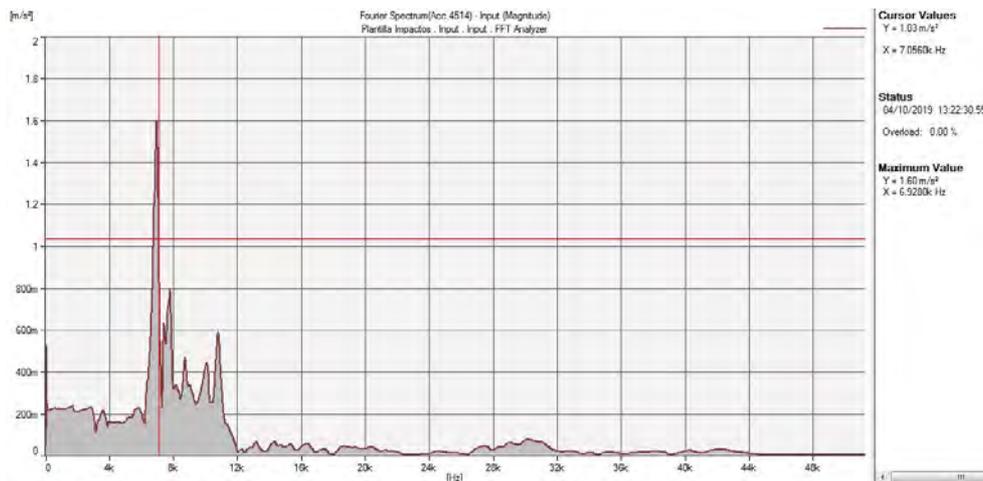


(ñ) Modo torsional

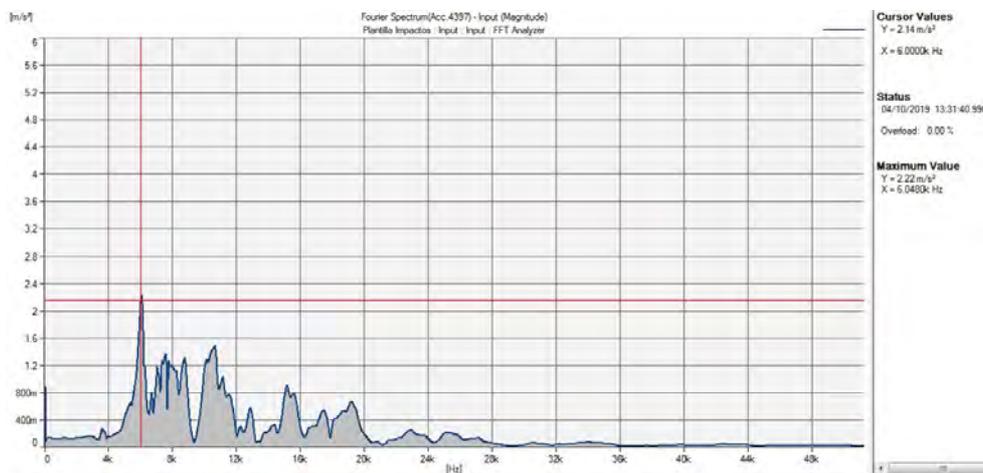
Serie 4. Probeta 2



(o) Modo transversal

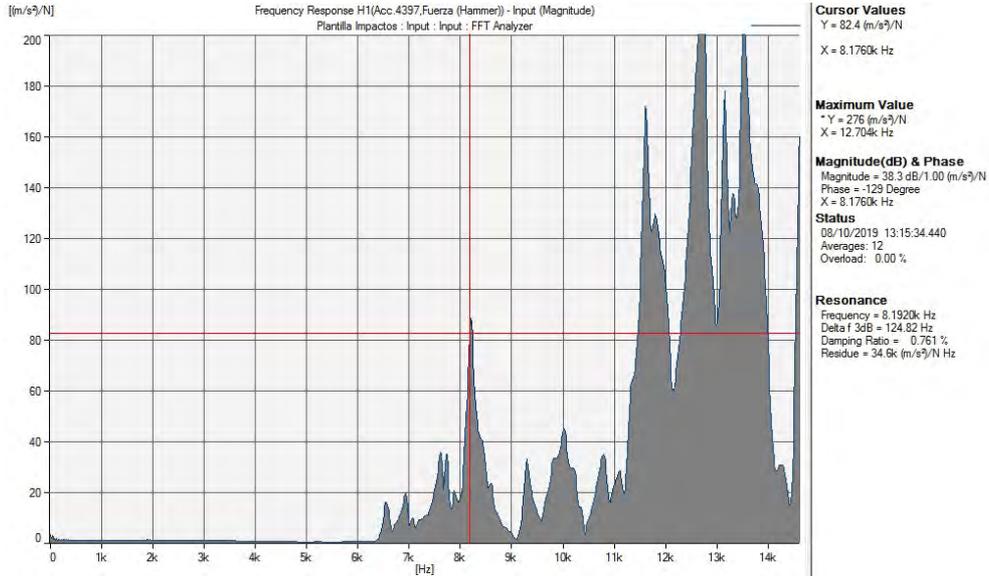


(p) Modo longitudinal

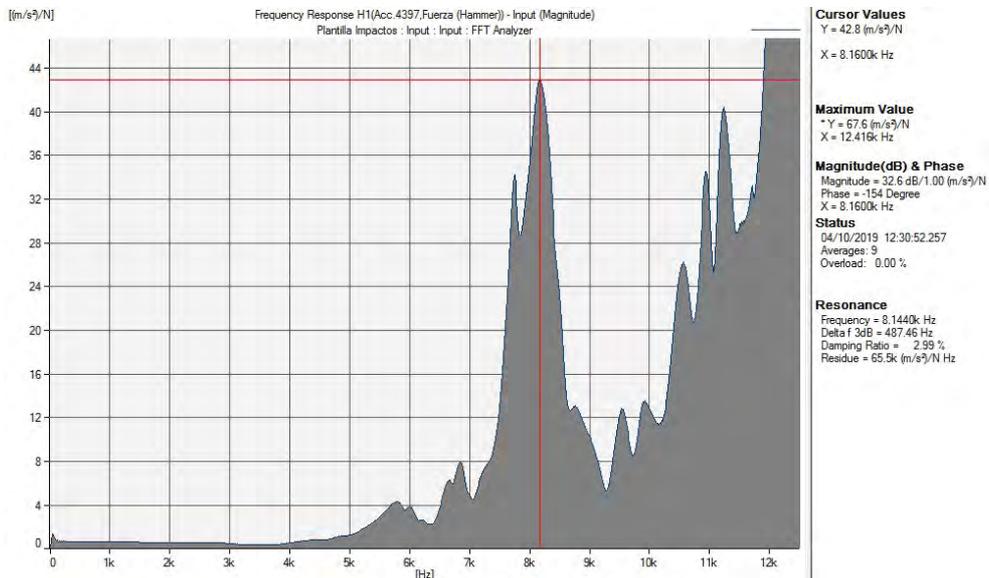


(q) Modo torsional

Serie 4. Probetas 3 y 4



(r) Modo transversal



(s) Modo transversal

Apéndice F

Tablas de cálculo de módulos de elasticidad y rigidez transversal a partir de frecuencias de resonancia

Tabla de recogida de datos para FFRF en probetas prismáticas

	Longitud L (m)	Canto t (m)	Anchura b (m)	Sección A=b·t (m ²)	Radio de giro t/3.464	K/L	Factor corrector ASTM C215 (T)	Factor de forma R	Masa (g)	Frecuencia Transversal (Hz)	Media Frecuencia Transversal (Hz)	Frecuencia Longitudinal (Hz)	Media Frecuencia Longitudinal (Hz)	Frecuencia Torsional (Hz)	Media Frecuencia Torsional (Hz)
P-1	0,4418	0,1048	0,1011	0,01060	0,03027	0,06851	1,387	1,17772	9348	944	944	2200	2200	1224	1224
										944		2200		1224	
										944		2200		1224	
P-2	0,4430	0,10301	0,10118	0,01042	0,02974	0,06713	1,373	1,18068	9185	808	808	1912	1912	752	747
										808		1912		744	
										808		1912		744	
P-3	0,4430	0,10248	0,10200	0,01045	0,02958	0,06678	1,369	1,18271	9203	864	864	2112	2107	864	864
										864		2104		864	
										864		2104		864	
P-4	0,4433	0,1058	0,1015	0,01074	0,03053	0,06888	1,391	1,17705	9227	792	792	1936	1936	784	784
										792		1936		784	
										792		1936		784	
P-5	0,4433	0,10545	0,10128	0,01068	0,03044	0,06868	1,389	1,17713	9189	576	573	1312	1299	696	693
										576		1296		696	
										568		1288		688	
P-6	0,4449	0,10312	0,10175	0,01049	0,02977	0,06692	1,370	1,18138	9369	888	888	2096	2096	880	880
										888		2096		880	
										888		2096		880	
P-7	0,4429	0,1042	0,1013	0,01055	0,03007	0,06789	1,380	1,17906	9331	816	816	1984	1989	1208	1208
										816		1992		1208	
										816		1992		1208	
P-8	0,4438	0,1033	0,1011	0,01044	0,02981	0,06717	1,373	1,18015	9347	800	800	1984	1984	1232	1232
										800		1984		1232	
										800		1984		1232	
P-9	0,4443	0,1033	0,1012	0,01045	0,02981	0,06710	1,372	1,18028	9460	888	888	2192	2195	1344	1344
										888		2200		1344	
										888		2192		1344	
P-10	0,4440	0,1012	0,1016	0,01029	0,02923	0,06582	1,359	1,18401	9340	872	872	2104	2109	1296	1296
										872		2112		1296	
										872		2112		1296	
P-11	0,4431	0,1029	0,1015	0,01044	0,02971	0,06705	1,372	1,18124	9358	872	872	2120	2120	1112	1112
										872		2120		1112	
										872		2120		1112	
P-12	0,4445	0,1023	0,1013	0,01037	0,02954	0,06645	1,365	1,18194	9320	920	920	2200	2200	1360	1363
										920		2200		1368	
										920		2200		1360	

Tabla de cálculo de módulos de elasticidad y rigidez transversal a partir del ensayo FFRF en probetas prismáticas

	Modo Transversal					Modo Longitudinal					Modo Torsional				
	Módulo elasticidad Dinámico. E_d [MPa]	Módulo elasticidad Estático. E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo elasticidad Dinámico. E_d [MPa]	Módulo elasticidad Estático. E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo rigidez Dinámico. (Gd) [MPa]	Módulo rigidez Estático. (Gs) [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación G_s / G_d
P-1	8094	6849	0.833%	0,009	0,846	7546	6579	0.482%	0,005	0,872	2751	2333	0.829%	0,008	0,848
			0.879%					0.479%					0.815%		
			0.862%					0.476%					0.831%		
P-2	6123	5131	1.010%	0,010	0,838	5709	4830	0.888%	0,009	0,846	1028	836	1.610%	0,017	0,813
			1.030%					0.871%					1.710%		
			1.040%					0.844%					1.670%		
P-3	7047	5922	0.975%	0,010	0,840	6924	6010	0.524%	0,005	0,868	1377	1162	0.926%	0,009	0,844
			0.984%					0.525%					0.907%		
			0.981%					0.529%					0.907%		
P-4	5523	4616	1.020%	0,010	0,836	5710	4794	1.050%	0,010	0,840	1102	926	0.974%	0,010	0,840
			1.030%					1.000%					0.996%		
			1.030%					0.956%					0.985%		
P-5	2911	2339	2.000%	0,020	0,804	2573	2046	2.220%	0,023	0,795	863	689	2.150%	0,022	0,798
			1.980%					2.290%					2.180%		
			1.920%					2.320%					2.240%		
P-6	7559	6404	0.895%	0,009	0,847	6980	5884	0.876%	0,009	0,843	1454	1222	0.998%	0,010	0,841
			0.902%					0.885%					0.952%		
			0.903%					1.020%					0.969%		
P-7	6162	5219	0.864%	0,009	0,847	6203	5404	0.484%	0,005	0,871	2697	2291	0.825%	0,008	0,850
			0.876%					0.457%					0.809%		
			0.816%					0.490%					0.788%		
P-8	6104	5186	0.799%	0,008	0,849	6258	5414	0.592%	0,006	0,865	2848	2429	0.744%	0,007	0,853
			0.811%					0.564%					0.761%		
			0.805%					0.565%					0.731%		
P-9	7625	6587	0.890%	0,006	0,864	7751	6696	0.581%	0,006	0,864	3431	2863	1.110%	0,011	0,835
			0.582%					0.582%					1.120%		
			0.990%					0.582%					1.080%		
P-10	7583	6402	0.931%	0,009	0,844	7174	6259	0.471%	0,005	0,872	3207	2747	0.686%	0,007	0,857
			0.936%					0.474%					0.689%		
			0.935%					0.474%					0.690%		
P-11	7268	6130	0.913%	0,009	0,844	7140	6233	0.463%	0,005	0,873	2321	1950	0.973%	0,010	0,840
			0.920%					0.467%					0.951%		
			0.916%					0.466%					1.020%		
P-12	8251	7026	0.832%	0,009	0,852	7737	6761	0.432%	0,005	0,874	3508	3006	0.699%	0,007	0,857
			0.834%					0.435%					0.670%		
			0.836%					0.462%					0.639%		

Tabla de recogida de datos para FFRF en probetas cúbicas. Series 1, 2 y 3

	Longitud L (m)	Canto t (m)	Anchura b (m)	Sección A=b·t (m ²)	Radio de giro t/3.464	K/L	Factor corrector ASTM C215 (T)	Factor de forma R	Masa (g)	Frecuencia Transversal (Hz)	Media Frecuencia Transversal (Hz)	Frecuencia Longitudinal (Hz)	Media Frecuencia Longitudinal (Hz)	Frecuencia Torsional (Hz)	Media Frecuencia Torsional (Hz)
1.1	0.1004	0.1014	0.1036	0.01051	0.02927	0.29156	6.014	1.18681	2101	8080	8091	8304	8251	5328	5328
										8080		8224		5328	
										8112		8224		5328	
1.2	0.1005	0.1030	0.1023	0.01054	0.02973	0.29586	6.142	1.18241	2128	8736	8619	8560	8555	5488	5493
										8528		8640		5504	
										8592		8464		5488	
1.3	0.1005	0.1010	0.1019	0.01029	0.02916	0.29015	5.972	1.18478	2248	8848	8848	8784	8704	5824	5691
										8864		8672		5456	
										8832		8656		5792	
1.4	0.1004	0.1044	0.1014	0.01059	0.03014	0.30021	6.274	1.17895	2178	8960	8976	8304	8288	5952	5947
										8992		8272		5952	
										8976		8288		5936	
2.1	0.0997	0.1025	0.1008	0.01033	0.02959	0.29679	6.170	1.18087	2084	7904	7653	7760	7808	5536	5541
										7230		7968		5536	
										7824		7696		5552	
2.2	0.1002	0.1004	0.1013	0.01016	0.02897	0.28920	5.944	1.18480	2034	7808	7749	7792	7733	5504	5493
										7728		7840		5472	
										7712		7568		5504	
2.3	0.1002	0.1038	0.1011	0.01048	0.02995	0.29885	6.233	1.17937	2097	8064	8043	8112	8117	5584	5456
										8032		8080		5376	
										8032		8160		5408	
2.4	0.1003	0.1008	0.1009	0.01018	0.02911	0.29032	5.977	1.18357	2006	8032	8027	8288	8277	4496	4432
										8064		8256		4496	
										7984		8288		4304	
3.1	0.1004	0.1046	0.1018	0.01065	0.03020	0.30076	6.291	1.17925	2022	7536	7312	7216	7323	5920	5067
										6896		7232		4512	
										7504		7520		4768	
3.2	0.1005	0.1017	0.1012	0.01030	0.02937	0.29236	6.037	1.18267	1954	7568	7488	7792	7733	4560	4853
										7440		7536		5008	
										7456		7872		4992	
3.3	0.1003	0.1028	0.1010	0.01039	0.02968	0.29582	6.141	1.18074	1970	7440	7397	7280	7232	4752	4795
										7328		7232		4896	
										7424		7184		4736	
3.4	0.1004	0.1004	0.1018	0.01022	0.02899	0.28868	5.928	1.18558	1968	7088	6965	6832	6912	4480	4485
										6992		7104		4464	
										6816		6800		4512	

Tabla de recogida de datos para FFRF en probetas cúbicas. Series 4, 5 y 6

	Longitud L (m)	Canto t (m)	Anchura b (m)	Sección A=b·t (m ²)	Radio de giro t/3.464	K/L	Factor corrector ASTM C215 (T')	Factor de forma R	Masa (g)	Frecuencia Transversal (Hz)	Media Frecuencia Transversal (Hz)	Frecuencia Longitudinal (Hz)	Media Frecuencia Longitudinal (Hz)	Frecuencia Torsional (Hz)	Media Frecuencia Torsional (Hz)
4.1	0.1000	0.1011	0.1017	0.01028	0.02919	0.29186	6.022	1.18435	1986	7248	7216	7216	7147	6016	6000
										7216		7104		5936	
										7184		7104		6048	
4.2	0.1001	0.1004	0.1013	0.01018	0.02899	0.28952	5.953	1.18485	2083	7296	7301	7152	7051	6016	6048
										7312		6832		6080	
										7296		7168		6048	
4.3	0.1000	0.0996	0.1011	0.01008	0.02876	0.28756	5.895	1.18580	2098	7728	7877	8128	8085	5552	5520
										7712		8016		5504	
										8192		8112		5504	
4.4	0.1000	0.0963	0.1009	0.00972	0.02780	0.27803	5.618	1.19119	2043	8144	7936	7664	7648	5536	5493
										7824		7680		5472	
										7840		7600		5472	
5.1	0.1002	0.1009	0.1024	0.01033	0.02913	0.29070	5.988	1.18574	1979	7952	7819	8144	7936	5328	5157
										7632		7760		5024	
										7872		7904		5120	
5.2	0.0999	0.1042	0.1023	0.01066	0.03009	0.30135	6.309	1.18050	2096	8064	7979	7904	7925	5088	5120
										7872		7904		5152	
										8000		7968		5120	
5.3	0.0998	0.1030	0.1017	0.01047	0.02974	0.29800	6.207	1.18142	2101	8576	8437	8432	8225	5568	5611
										8176		8132		5552	
										8560		8112		5712	
5.4	0.1000	0.1035	0.1017	0.01052	0.02988	0.29882	6.232	1.18072	2113	8432	8299	8016	8213	5664	5563
										8128		8304		5520	
										8336		8320		5504	
6.1	0.1000	0.1011	0.1017	0.01028	0.02919	0.29186	6.022	1.18435	2071	8304	8352	8464	8464	5600	5701
										8464		8480		5584	
										8288		8448		5920	
6.2	0.1001	0.1004	0.1013	0.01018	0.02899	0.28952	5.953	1.18485	2042	7984	8048	8176	8053	5488	5557
										8080		7920		5472	
										8080		8064		5712	
6.3	0.1000	0.0996	0.1011	0.01008	0.02876	0.28756	5.895	1.18580	2039	7856	8101	8128	8085	5552	5520
										8208		8016		5504	
										8240		8112		5504	
6.4	0.1000	0.0963	0.1009	0.00972	0.02780	0.27798	5.617	1.19119	2112	7664	7813	7664	7648	5536	5493
										7888		7680		5472	
										7888		7600		5472	

Tabla de cálculo de módulos de elasticidad y rigidez transversal a partir del ensayo FFRF en probetas cúbicas. Series 1, 2 y 3

	Modo Transversal					Modo Longitudinal					Modo Torsional				
	Módulo elasticidad Dinámico, E_d [MPa]	Módulo elasticidad Estático, E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo elasticidad Dinámico, E_d [MPa]	Módulo elasticidad Estático, E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo rigidez Dinámico, G_d [MPa]	Módulo rigidez Estático, G_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación G_s / G_d
1.1	7332	6369	0,511%	0,005	0,869	5466	4708	0,399%	0,006	0,861	2705	2263	1,210%	0,011	0,836
			0,478%					0,741%					1,280%		
			0,567%					0,722%					0,693%		
1.2	8342	7033	0,837%	0,009	0,843	5940	4943	0,651%	0,012	0,832	2896	2467	0,668%	0,008	0,852
			1,110%					1,070%					0,741%		
			0,828%					1,750%					0,887%		
1.3	9614	8165	0,575%	0,008	0,849	6652	5458	2,100%	0,015	0,820	3369	2859	0,755%	0,008	0,849
			0,609%					0,747%					0,617%		
			1,250%					1,510%					1,000%		
1.4	9133	7848	0,744%	0,008	0,859	5673	4907	0,692%	0,006	0,865	3443	2922	0,745%	0,008	0,849
			0,741%					0,558%					0,764%		
			0,825%					0,451%					0,946%		
2.1	6507	5373	1,240%	0,013	0,826	4904	4092	0,969%	0,011	0,834	2917	2485	0,741%	0,008	0,852
			1,080%					1,400%					0,915%		
			1,610%					0,945%					0,632%		
2.2	6749	5667	1,240%	0,010	0,840	4797	3961	1,970%	0,013	0,826	2868	2396	0,630%	0,011	0,836
			0,653%					1,270%					0,843%		
			1,060%					0,692%					1,770%		
2.3	7137	6157	0,835%	0,006	0,863	5283	4511	0,642%	0,007	0,854	2815	2391	0,750%	0,008	0,849
			0,432%					0,971%					0,918%		
			0,530%					0,588%					0,766%		
2.4	7121	6055	0,709%	0,008	0,850	5416	4573	0,567%	0,009	0,844	1838	1478	2,260%	0,019	0,804
			1,070%					0,499%					1,920%		
			0,594%					1,640%					1,660%		
3.1	5591	4698	0,900%	0,010	0,840	4089	3273	1,210%	0,021	0,800	2309	1918	1,100%	0,012	0,831
			1,220%					3,490%					1,630%		
			0,822%					1,560%					1,420%		
3.2	5953	5172	0,577%	0,007	0,869	4559	3756	0,620%	0,014	0,824	2124	1754	0,744%	0,013	0,826
			0,714%					0,471%					2,510%		
			0,711%					2,990%					0,652%		
3.3	5763	4893	1,000%	0,008	0,849	3981	3334	1,100%	0,010	0,837	2066	1724	0,815%	0,011	0,835
			0,501%					0,874%					1,680%		
			0,946%					1,150%					0,813%		
3.4	5262	4480	0,710%	0,009	0,851	3694	3140	0,927%	0,008	0,850	1844	1557	0,761%	0,009	0,844
			1,050%					0,596%					0,942%		
			0,811%					0,866%					1,010%		

Tabla de cálculo de módulos de elasticidad y rigidez transversal a partir del ensayo FFRF en probetas cúbicas. Series 4, 5 y 6

	Modo Transversal					Modo Longitudinal					Modo Torsional				
	Módulo elasticidad Dinámico, E_d [MPa]	Módulo elasticidad Estático, E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo elasticidad Dinámico, E_d [MPa]	Módulo elasticidad Estático, E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo rigidez Dinámico (Gd) [MPa]	Módulo rigidez Estático (Gs) [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación G_s / G_d
4.1	5608	4539	1.092%	0,018	0,809	3946	3253	0.790%	0,014	0,824	3294	2762	0.507%	0,010	0,838
			1.780%					0.901%					0.621%		
			1.890%					2.450%					1.870%		
4.2	6120	5091	1.000%	0,012	0,832	4075	3426	0.491%	0,010	0,841	3553	2883	0.741%	0,017	0,811
			1.280%					0.811%					0.745%		
			1.120%					1.620%					3.600%		
4.3	7266	6193	0.529%	0,008	0,852	5445	4689	0.364%	0,006	0,861	3010	2554	0.893%	0,008	0,848
			0.985%					0.699%					0.795%		
			0.761%					0.599%					0.786%		
4.4	7589	5852	2.990%	0,017	0,771	4918	4157	0.939%	0,009	0,845	3022	2563	0.815%	0,008	0,848
			1.270%					0.537%					0.925%		
			0.931%					1.170%					0.763%		
5.1	6557	5647	0.502%	0,006	0,861	4835	4026	1.820%	0,011	0,833	2421	1984	1.140%	0,015	0,819
			0.791%					0.799%					1.080%		
			0.562%					0.819%					2.230%		
5.2	6849	5664	1.400%	0,011	0,827	4933	4165	0.853%	0,009	0,844	2430	2041	0.781%	0,010	0,840
			1.240%					0.782%					0.901%		
			0.725%					1.070%					1.290%		
5.3	7856	6686	0.499%	0,008	0,851	5418	4441	2.870%	0,015	0,820	2978	2530	0.812%	0,008	0,850
			1.390%					0.698%					0.741%		
			0.447%					0.850%					0.860%		
5.4	7611	6365	0.518%	0,011	0,836	5417	4611	0.626%	0,008	0,851	2934	2493	0.585%	0,008	0,850
			1.750%					1.050%					0.778%		
			0.924%					0.655%					1.050%		
6.1	7835	6774	0.512%	0,006	0,865	5772	4919	0.700%	0,008	0,852	3102	2649	0.561%	0,007	0,854
			0.642%					0.901%					0.621%		
			0.562%					0.677%					1.010%		
6.2	7289	6166	1.090%	0,009	0,846	5212	4410	0.491%	0,009	0,846	2941	2452	0.741%	0,011	0,834
			0.538%					0.811%					0.745%		
			1.120%					1.300%					1.870%		
6.3	7469	6421	0.488%	0,006	0,860	5292	4557	0.564%	0,006	0,861	2925	2482	0.892%	0,008	0,848
			0.983%					0.699%					0.795%		
			0.456%					0.599%					0.786%		
6.4	7607	6268	1.260%	0,012	0,824	5085	4298	0.939%	0,009	0,845	3125	2650	0.813%	0,008	0,848
			1.270%					0.537%					0.925%		
			0.931%					1.170%					0.763%		

Tabla de recogida de datos para FFRF en sub-probetas 205.100.100. Dosificación 3:1

	Longitud L (m)	Caño t (m)	Anchura b (m)	Sección A=b·t (m ²)	Radio de giro i/3.464	K/L	Factor corrector ASTM C215 (T)	Factor de forma R	Masa (g)	Frecuencia Transversal (Hz)	Media Frecuencia Transversal (Hz)	Frecuencia Longitudinal (Hz)	Media Frecuencia Longitudinal (Hz)	Frecuencia Torsional (Hz)	Media Frecuencia Torsional (Hz)
sP-1.1	0.2050	0.1038	0.1036	0.01075	0.02995	0.14610	2.558	1.18318	4380	3320	3320	4952	4952	2904	2893
										3320		4952		2888	
										3320		4952		2888	
sP-1.2	0.2050	0.1038	0.1036	0.01075	0.02997	0.14617	2.559	1.18314	4335	3488	3483	4920	4923	2600	2531
										3480		4928		2504	
										3480		4920		2488	
sP-3.1	0.2050	0.1038	0.1032	0.01071	0.02997	0.14617	2.559	1.18247	4222	3256	3245	4784	4784	3064	3171
										3240		4784		3216	
										3240		4784		3232	
sP-6.1	0.2060	0.1023	0.1033	0.01057	0.02953	0.14336	2.509	1.18494	4323	3376	3268	5200	5200	3120	3120
										3277		5200		3120	
										3152		5200		3120	
sP-6.2	0.2060	0.1032	0.1027	0.01060	0.02979	0.14462	2.532	1.18269	4325	3344	3345	4960	4983	3360	3360
										3352		4992		3360	
										3340		4997		3360	

Tabla de cálculo de módulos de elasticidad y rigidez transversal a partir del ensayo FFRF en sub-probetas 205.100.100. Dosificación 3:1

	Modo Transversal					Modo Longitudinal					Modo Torsional				
	Módulo elasticidad Dinámico. E_d [MPa]	Módulo elasticidad Estático. E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo elasticidad Dinámico. E_d [MPa]	Módulo elasticidad Estático. E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo rigidez Dinámico. (Gd) [MPa]	Módulo rigidez Estático (Gs) [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación G_s / G_d
sP-1.1	8704	7414	0.791%	0,008	0.852	8196	7085	0.575%	0,006	0.864	3310	2770	1.010%	0,011	0.837
			0.767%					0.572%					1.070%		
			0.743%					0.570%					1.080%		
sP-1.2	9468	8055	0.746%	0,008	0.851	8010	6653	1.210%	0,012	0.831	2505	1892	4.400%	0,043	0.755
			0.838%					1.200%					4.350%		
			0.768%					1.190%					4.260%		
sP-3.1	8041	5237	3.360%	0,030	0.651	7399	6123	1.300%	0,013	0.828	3843	3097	1.840%	0,019	0.806
			2.910%					1.270%					1.960%		
			2.840%					1.230%					1.900%		
sP-6.1	8669	7056	1.666%	0,016	0.814	9115	7529	1.130%	0,013	0.826	3888	3252	1.050%	0,011	0.836
			1.570%					1.625%					1.110%		
			1.690%					1.160%					1.030%		
sP-6.2	8981	7634	0.869%	0,009	0.850	8349	7252	0.536%	0,005	0.869	4490	3819	0.737%	0,008	0.851
			0.901%					0.532%					0.834%		
			0.845%					0.510%					0.866		

Tabla de recogida de datos para FFRF en sub-probetas 205.100.100. Dosificación 4:1

	Longitud L (m)	Canto i (m)	Anchura b (m)	Sección $A=b \cdot t$ (m ²)	Radio de giro i/3.464	K/L	Factor corrector ASTM C215 (T)	Factor de forma R	Masa (g)	Frecuencia Transversal (Hz)	Media Frecuencia Transversal (Hz)	Frecuencia Longitudinal (Hz)	Media Frecuencia Longitudinal (Hz)	Frecuencia Torsional (Hz)	Media Frecuencia Torsional (Hz)
sP-7.1	0.20500	0.10405	0.10279	0.01070	0.03004	0.14652	2.565	1.18156	4270	2928	2928	4432	4432	2488	2475
										2936		4432		2472	
										2920		4432		2464	
sP-7.2	0.20500	0.10328	0.10276	0.01061	0.02982	0.14544	2.546	1.18266	4295	3016	3011	4464	4467	2616	2619
										3008		4464		2608	
										3008		4472		2632	
sP-9.1	0.20400	0.10449	0.10264	0.01072	0.03016	0.14787	2.589	1.18069	4334	3376	3376	5104	5104	3120	3120
										3376		5104		3120	
										3376		5104		3120	
sP-9.2	0.20400	0.10343	0.10242	0.01059	0.02986	0.14637	2.562	1.18193	4343	3248	3248	4976	4976	3056	3056
										3248		4976		3056	
										3248		4976		3056	
sP-10.1	0.20450	0.10105	0.10290	0.01040	0.02917	0.14265	2.497	1.18628	4352	3120	3120	4976	4978	2960	2960
										3120		4992		2960	
										3120		4966		2960	
sP-10.2	0.20500	0.09994	0.10263	0.01026	0.02885	0.14074	2.464	1.18765	4278	3312	3320	4992	4994	3024	3024
										3320		4997		3024	
										3328		4992		3024	
sP-11.1	0.20400	0.10201	0.10201	0.01041	0.02945	0.14436	2.527	1.18343	4303	3328	3333	4896	4928	3312	3312
										3340		4990		3312	
										3330		4898		3312	
sP-11.2	0.20600	0.10534	0.10184	0.01073	0.03041	0.14762	2.585	1.17820	4347	3440	3469	5008	5009	3168	3125
										3440		5008		3168	
										3528		5012		3040	
sP-12.1	0.20500	0.10179	0.10235	0.01042	0.02939	0.14334	2.509	1.18428	4342	3462	3456	5120	5123	3472	3472
										3450		5128		3472	
										3456		5120		3472	
sP-12.2	0.20500	0.10149	0.10228	0.01038	0.02930	0.14292	2.502	1.18463	4269	3473	3475	5208	5202	3152	3152
										3480		5197		3152	
										3472		5200		3152	

Tabla de cálculo de módulos de elasticidad y rigidez transversal a partir del ensayo FFRF en sub-probetas 205.100.100. Dosificación 4:1

	Modo Transversal					Modo Longitudinal					Modo Torsional									
	Módulo elástico Dinámico E_d [MPa]	Módulo elástico Estático E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo elástico Dinámico E_d [MPa]	Módulo elástico Estático E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo rigidez Dinámico (Gd) [MPa]	Módulo rigidez Estático (Gs) [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación Gs / Gd					
sP-7.1	6612	5600	0,893%	0,009	0,847	6431	5473	0,764%	0,008	0,851	2369	1935	1,460%	0,016	0,817					
		0,764%																		
		0,900%																		
sP-7.2	7139	6154	0,866%	0,006	0,862	6621	5485	0,827%	0,012	0,828	2691	2199	1,570%	0,015	0,817					
		0,604%																		
		0,650%																		
sP-9.1	8776	7527	0,669%	0,007	0,858	8590	7377	0,646%	0,007	0,859	3790	3193	0,916%	0,009	0,842					
		0,664%																		
		0,682%																		
sP-9.2	8324	7244	0,660%	0,007	0,870	8283	7099	0,679%	0,007	0,857	3693	3156	0,752%	0,007	0,855					
		0,653%																		
		0,682%																		
sP-10.1	8064	6910	0,662%	0,007	0,857	8484	7375	0,514%	0,005	0,869	3558	2924	1,430%	0,014	0,822					
		0,669%																		
		0,722%																		
sP-10.2	9246	7924	0,670%	0,007	0,857	8529	7331	0,627%	0,006	0,860	3714	3201	0,392%	0,006	0,862					
		0,683%																		
		0,688%																		
sP-11.1	8961	7310	1,560%	0,016	0,816	8194	6823	1,130%	0,011	0,833	4380	3661	1,040%	0,011	0,836					
		1,320%																		
		1,670%																		
sP-11.2	9399	7673	0,923%	0,012	0,816	8378	7231	0,553%	0,006	0,863	3843	3184	1,370%	0,012	0,829					
		1,350%																		
		1,440%																		
sP-12.1	9829	8521	0,543%	0,005	0,867	8968	7756	0,574%	0,006	0,865	4879	4237	0,569%	0,005	0,868					
		0,542%																		
		0,533%																		
sP-12.2	9835	8595	0,613%	0,006	0,874	9125	7967	0,471%	0,005	0,873	3969	3397	0,705%	0,007	0,856					
		0,603%																		
		0,612%																		

Tabla de recogida de datos para FFRF en sub-probetas cúbicas 100.100.100. Dosificación 3:1

	Longitud L (m)	Carro t (m)	Anchura b (m)	Sección A=b ² (m ²)	Radio de giro L/3,464	R/L	Factor corrector ASTM C215 (T)	Factor de forma R	Masa (g)	Frecuencia Transversal (Hz)	Media Frecuencia Transversal (Hz)	Frecuencia Longitudinal (Hz)	Media Frecuencia Longitudinal (Hz)	Frecuencia Torsional (Hz)	Media Frecuencia Torsional (Hz)
ssP-1.1.1	0,1004	0,1019	0,1011	0,01030	0,02942	0,29300	6,056	1,18222	2069	9200	9189	9072	9077	5904	5899
										9184		9088		5888	
										9184		9072		5904	
ssP-1.1.2	0,1028	0,1014	0,1011	0,01025	0,02928	0,28478	5,814	1,18296	2092	9328	9328	8928	9088	5648	5627
										9328		8896		5616	
										9328		9440		5616	
ssP-1.2.1	0,1004	0,1021	0,1015	0,01036	0,02947	0,29357	6,074	1,18253	2073	8848	8848	8784	8704	5824	5691
										8864		8672		5456	
										8832		8656		5792	
ssP-1.2.2	0,1001	0,0998	0,1026	0,01024	0,02881	0,28782	5,903	1,18783	2047	8960	8976	8304	8288	5952	5947
										8992		8272		5952	
										8976		8288		5936	
ssP-6.1.1	0,1012	0,1009	0,1020	0,01029	0,02913	0,28794	5,906	1,18509	2053	3265	3152	9102	9093	3230	3230
										3264		9088		3230	
										2928		9088		3230	
ssP-6.1.2	0,1011	0,1009	0,1020	0,01029	0,02913	0,28811	5,911	1,18512	2071	9277	9277	7872	7877	6615	6615
										9277		7888		6615	
										9392		7872		6615	
ssP-6.2.1	0,1011	0,1012	0,1034	0,01046	0,02923	0,28908	5,940	1,18668	2108	9392	9302	7770	7769	6896	6896
										9392		7760		6896	
										9232		8032		6520	
ssP-6.2.2	0,1006	0,1007	0,1020	0,01027	0,02907	0,28894	5,936	1,18543	2068	9232	9232	8112	8059	6560	6547
										9232		8032		6560	
										9232		8032		6560	

Tabla de cálculo de módulos de elasticidad y rigidez transversal a partir del ensayo FFRF en sub-probetas cúbicas 100.100.100. Dosificación 3:1

	Modo Transversal					Modo Longitudinal					Modo Torsional				
	Módulo elástico Dinámico, E_d [MPa]	Módulo elástico Estático, E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s/E_d	Módulo elástico Dinámico, E_d [MPa]	Módulo elástico Estático, E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s/E_d	Módulo rigidez Dinámico, (Gd) [MPa]	Módulo rigidez Estático, (Gs) [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación Gs/Gd
ssP-1.1.1	9474	7977	1,000%	0,009	0,842	6646	5703	0,697%	0,007	0,858	3318	2798	0,837%	0,009	0,843
			0,977%					0,578%					0,985%		
			0,866%					0,520%					0,918%		
ssP-1.1.2	10319	8640	1,070%	0,010	0,837	6930	5742	0,878%	0,012	0,829	3142	2620	1,130%	0,011	0,834
			1,000%					1,480%					1,110%		
			1,060%					1,370%					1,110%		
ssP-1.2.1	8739	7477	0,575%	0,008	0,856	6086	4993	2,100%	0,015	0,820	3076	2611	0,753%	0,008	0,849
			0,609%					0,547%					0,617%		
			1,250%					1,510%					1,090%		
ssP-1.2.2	9061	7716	0,744%	0,008	0,852	5498	4758	0,692%	0,006	0,865	3362	2854	0,743%	0,008	0,849
			0,741%					0,545%					0,764%		
			0,825%					0,451%					0,940%		
ssP-6.1.1	1127	850	4,710%	0,044	0,754	6674	4925	3,750%	0,056	0,738	998	718	7,350%	0,073	0,719
			4,340%					3,270%					7,220%		
			4,120%					3,570%					7,290%		
ssP-6.1.2	9834	8076	1,233%	0,014	0,821	5050	4048	1,943%	0,020	0,802	4220	3572	0,893%	0,009	0,846
			1,356%					2,078%					0,812%		
			1,702%					2,110%					0,884%		
ssP-6.2.1	10073	8607	0,830%	0,008	0,855	4917	3925	1,840%	0,022	0,798	4598	3901	0,892%	0,008	0,848
			0,810%					1,770%					0,795%		
			0,827%					2,500%					0,786%		
ssP-6.2.2	9680	7978	1,340%	0,014	0,824	5261	3993	4,099%	0,041	0,759	4116	3491	0,831%	0,008	0,848
			1,222%					4,12%					0,829%		
			1,510%					4,53%					0,767%		

Tabla de recogida de datos para FFRF en sub-probetas cúbicas 100.100.100. ssP-7.1.1 a ssP-9.2.2. Dosificación 4:1

	Longitud L (m)	Canto t (mm)	Anchura b (mm)	Sección A=b*t (mm ²)	Radio de giro $r_{3,464}$	K/L	Factor corrector ASTM C215 (F)	Factor de forma R	Masa (g)	Frecuencia Transversal (Hz)	Medio Frecuencia Transversal (Hz)	Frecuencia Longitudinal (Hz)	Medio Frecuencia Longitudinal (Hz)	Frecuencia Torsional (Hz)	Medio Frecuencia Torsional (Hz)
ssP-7.1.1	0,1004	0,1046	0,1018	0,01065	0,03019	0,30067	6,288	1,17933	2022	7536		7216		5920	
										6896	7312	7232	7323	4512	5067
										7504		7520		4768	
ssP-7.1.2	0,1005	0,1017	0,1012	0,01030	0,02937	0,29237	6,038	1,18266	1955	7568	7611	7792	7728	4560	4853
										7440		7536		5008	
										7824		7856		4992	
										7440		7280		4752	
ssP-7.2.1	0,1003	0,1028	0,1010	0,01039	0,02968	0,29584	6,142	1,18073	1971	7344	7403	7232	7232	4896	4795
										7424		7184		4736	
ssP-7.2.2	0,1004	0,1029	0,1018	0,01048	0,02971	0,29585	6,142	1,18177	1969	7088	7024	6832	6912	4480	4485
										6992		7104		4464	
										6992		6800		4512	
ssP-9.1.1	0,1012	0,1004	0,1016	0,01020	0,02898	0,28640	5,861	1,18528	2025	9392	9369	9089	9302	6192	6192
										9392		9408		6192	
										9322		9408		6192	
ssP-9.1.2	0,1004	0,1029	0,1021	0,01051	0,02971	0,29587	6,143	1,18223	2108						
ssP-9.2.1	0,1026	0,1007	0,0998	0,01005	0,02907	0,28345	5,775	1,18202	2057	7878	7885	7872	7875	6144	6144
										7888		7882		6144	
										7888		7872		6144	
										7840		7856		6128	
ssP-9.2.2	0,1027	0,1006	0,1028	0,01034	0,02904	0,28270	5,753	1,18684	2071	7840	7840	7860	7857	6128	6128
										7840		7856		6128	

Tabla de cálculo de módulos de elasticidad y rigidez transversal a partir del ensayo FFRF en sub-probetas cúbicas 100.100.100. ssP-7.1.1 a ssP-9.2.2. Dosificación 4:1

	Modo Transversal					Modo Longitudinal					Modo Torsional									
	Módulo elástico Dinámico, E_d [MPa]	Módulo elástico Estático, E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo elástico Dinámico, E_d [MPa]	Módulo elástico Estático, E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo rigidez Dinámico, (Gd) [MPa]	Módulo rigidez Estático, (Gs) [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación Gs / Gd					
ssP-7.1.1	5593	4699	0,900%	0,010	0,840	4090	3274	1,210%	0,021	0,800	2309	1919	1,100%	0,012	0,831					
		1,220%						3,490%									1,030%			
		0,822%						1,360%									1,420%			
ssP-7.1.2	6151	5279	0,577%	0,007	0,858	4554	3867	0,620%	0,008	0,849	2124	1755	0,744%	0,013	0,826					
		0,714%						0,471%									2,570%			
		0,702%						1,330%									0,652%			
ssP-7.2.1	5773	4901	1,000%	0,008	0,849	3982	3334	1,100%	0,010	0,837	2066	1725	0,815%	0,011	0,835					
		0,499%						0,874%									1,660%			
		0,946%						1,150%									0,873%			
ssP-7.2.2	5152	4401	0,710%	0,008	0,854	3606	3065	0,927%	0,008	0,850	1794	1526	0,761%	0,008	0,850					
		1,050%						0,596%									0,942%			
		0,720%						0,866%									0,681%			
ssP-9.1.1	9938	8430	0,822%	0,008	0,848	6953	5671	1,610%	0,016	0,816	3652	2776	4,750%	0,040	0,760					
		0,844%						1,630%									3,720%			
		0,816%						1,320%									3,600%			
ssP-9.1.2																				
ssP-9.2.1	7400	6197	1,000%	0,010	0,837	5209	4437	0,760%	0,008	0,852	3747	3174	0,852%	0,009	0,847					
		1,040%						0,810%									0,882%			
		1,080%						0,750%									0,817%			
ssP-9.2.2	7179	5506	1,810%	0,018	0,767	5080	4357	0,690%	0,007	0,858	3668	2944	1,890%	0,020	0,803					
		1,740%						0,720%									1,930%			
		1,780%						0,610%									2,190%			

Tabla de recogida de datos para FFRF en sub-probetas cúbicas 100.100.100. ssP-10.1.1 a ssP-12.2.2. Dosificación 4:1

	Longitud L (m)	Canto t (m)	Anchura b (m)	Sección A=b 1 (m ²)	Radio de giro (3.464)	K/L	Factor corrector ASTM C215. (1°)	Factor de forma R	Masa (g)	Frecuencia Transversal (Hz)	Medio Frecuencia Transversal (Hz)	Frecuencia Longitudinal (Hz)	Medio Frecuencia Longitudinal (Hz)	Frecuencia Torsional (Hz)	Medio Frecuencia Torsional (Hz)		
ssP-10.1.1	0,1009	0,1000	0,1027	0,01027	0,02888	0,28619	5,855	1,18755	2088	9456	9482	9443	9442	6032	6032		
										9533				9233			6032
										9456				9650			6032
ssP-10.1.2	0,1012	0,1003	0,1031	0,01034	0,02895	0,28609	5,852	1,18776	2144	8448	8443	8648	9355	6272	6272		
										8440				9640			6273
										8448				9378			6272
ssP-10.2.1	0,1001	0,1004	0,1037	0,01042	0,02900	0,28975	5,960	1,18857	2091	8912	8912	9482	9473	6096	6096		
										8912				9450			6096
										8912				9488			6096
ssP-10.2.2	0,1012	0,1007	0,1024	0,01031	0,02908	0,28740	5,890	1,18601	2087	9482	9321	9616	9481	6190	6190		
										9448				9211			6190
										9632				9616			6190
ssP-11.1.1	0,1019	0,1017	0,1005	0,01021	0,02934	0,28806	5,910	1,18161	2059	9488	9306	9476	9454	2763	2478		
										9563				9429			2336
										9468				9456			2336
ssP-11.1.2	0,1016	0,1013	0,1017	0,01030	0,02924	0,28792	5,906	1,18406	2087	10278	10496	9327	9138	2563	2557		
										10633				9015			2563
										10576				9072			2544
ssP-11.2.1	0,1011	0,1012	0,1034	0,01046	0,02923	0,28908	5,940	1,18668	2108	9392	9392	7770	7769	6896	6896		
										9392				7776			6896
										9392				7760			6896
ssP-11.2.2	0,1006	0,1007	0,1020	0,01027	0,02907	0,28894	5,936	1,18543	2068	9232	9232	8032	8059	6520	6547		
										9232				8112			6560
										9232				8032			6560
ssP-12.1.1	0,1000	0,1011	0,1017	0,01028	0,02918	0,29173	6,019	1,18435	1986	7248	7216	7216	7147	6016	6000		
										7216				7120			5936
										7184				7104			6048
ssP-12.1.2	0,1001	0,1004	0,1013	0,01018	0,02899	0,28954	5,953	1,18484	2083	7296	7294	7152	7051	6016	6053		
										7296				6832			6080
										7296				7168			6064
ssP-12.2.1	0,1000	0,0996	0,1011	0,01007	0,02876	0,28755	5,895	1,18580	2098	7728	7877	8128	8085	5552	5520		
										7712				8016			5504
										8192				8112			5504
ssP-12.2.2	0,1000	0,0963	0,1009	0,00972	0,02780	0,27802	5,618	1,19119	2043	8144	7936	7664	7648	5536	5493		
										7824				7680			5472
										7840				7600			5472

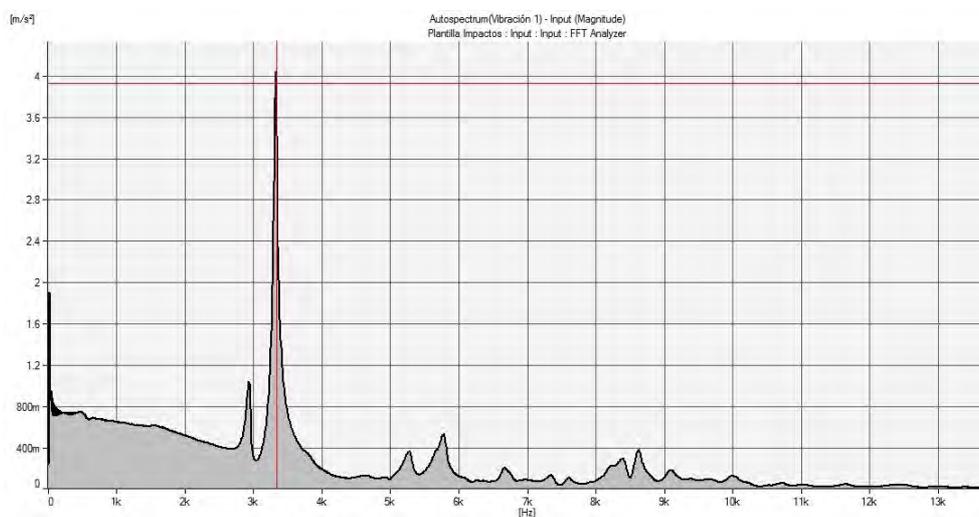
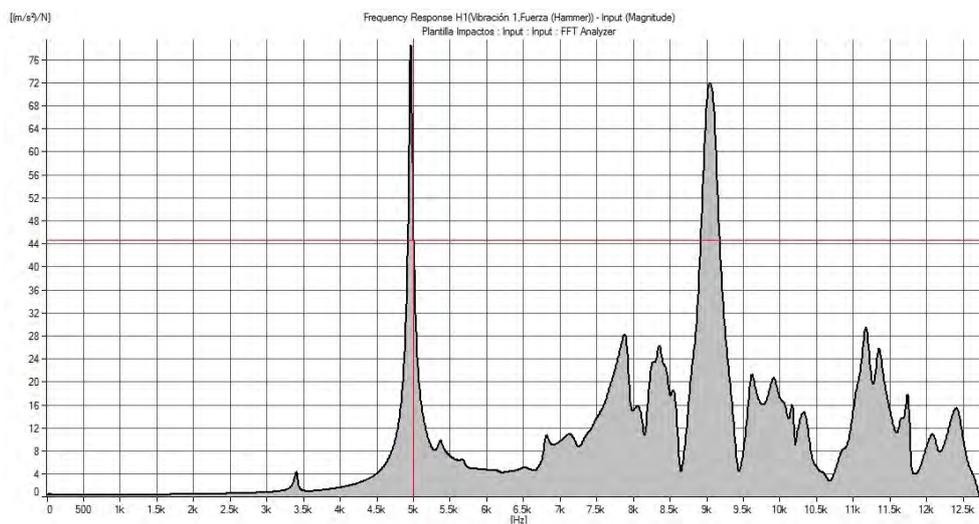
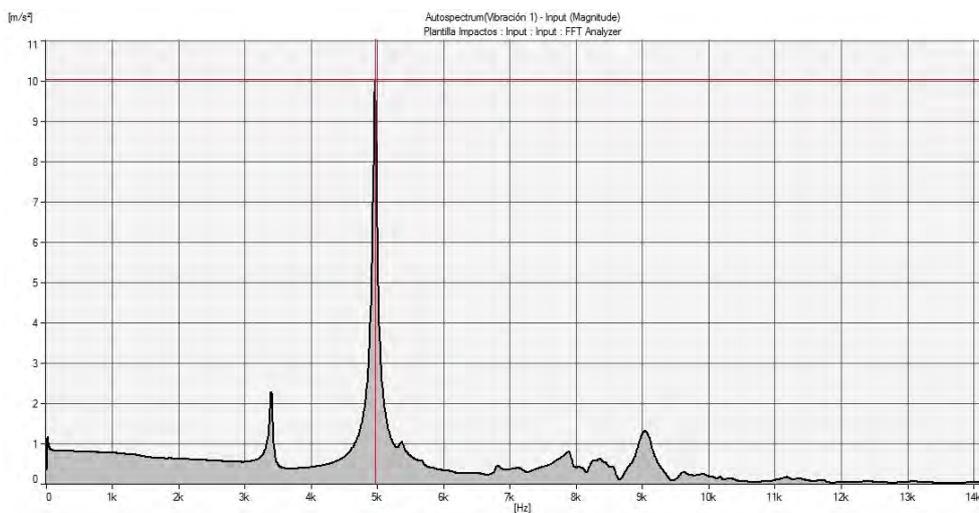
Tabla de cálculo de módulos de elasticidad y rigidez transversal a partir del ensayo FFRF en sub-probetas cúbicas 100.100.100. ssP-10.1.1 a ssP-12.2.2. Dosificación 4:1

	Modo Transversal					Modo Longitudinal					Modo Torsional				
	Módulo elasticidad Dinámico E_d [MPa]	Módulo elasticidad Estático. E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo elasticidad Dinámico E_d [MPa]	Módulo elasticidad Estático. E_s [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación E_s / E_d	Módulo rigidez Dinámico. (Gd) [MPa]	Módulo rigidez Estático. (Gs) [MPa]	Factor de amortig. (η)	η medio	Relación Gs / Gd
ssP-10.1.1	10398	8510	1,580% 1,430% 1,310%	0,015	0,818	7315	6294	0,652% 0,364% 0,673%	0,006	0,860	3546	2735	3,190% 3,220% 3,720%	0,034	0,771
ssP-10.1.2	8443	7305	0,551% 0,573% 0,565%	0,006	0,865	7667	6642	0,575% -0,574% 0,498%	0,005	0,866	3924	3386	0,593% 0,611% 0,581%	0,006	0,863
ssP-10.2.1	8933	7420	1,231% 1,116% 1,250%	0,012	0,831	7211	6214	0,582% 0,626% 0,641%	0,006	0,862	3549	2920	1,490% 1,220% 1,460%	0,014	0,823
ssP-10.2.2	10438	9140	0,628% 0,550% 0,54%	0,006	0,876	7362	6255	0,743% 0,829% 0,832%	0,008	0,850	3722	2988	1,890% 1,930% 2,190%	0,020	0,803
ssP-11.1.1	10428	8455	1,740% 1,777% 1,688%	0,017	0,811	7344	6005	1,559% 1,501% 1,510%	0,015	0,818	596	450	3,290% 4,120% 4,670%	0,044	0,755
ssP-11.1.2	12735	10323	1,793% 1,683% 1,750%	0,017	0,811	6872	5567	1,892% -0,850% 1,800%	0,018	0,810	637	467	6,027% 5,849% 6,020%	0,060	0,733
ssP-11.2.1	10073	8547	0,830% 0,810% 0,827%	0,008	0,849	4917	3925	1,840% 1,77% 2,509%	0,022	0,798	4598	3901	0,893% 0,795% 0,786%	0,008	0,848
ssP-11.2.2	9680	7800	1,340% 1,227% 1,300%	0,014	0,806	5261	3993	-0,099% 1,12% 4,58%	0,041	0,759	4116	3491	0,831% 0,829% 0,767%	0,008	0,848
ssP-12.1.1	5613	4853	0,512% 0,642% 0,562%	0,006	0,865	3948	3365	0,709% -0,901% 0,677%	0,008	0,852	3296	2815	0,561% 0,621% 1,010%	0,007	0,854
ssP-12.1.2	6107	5152	1,090% 0,538% 1,120%	0,009	0,844	4075	3448	0,491% 0,811% 1,306%	0,009	0,846	3559	2968	0,741% 0,745% 1,870%	0,011	0,834
ssP-12.2.1	7267	6105	0,329% 0,983% 0,715%	0,010	0,840	5446	4690	0,564% 0,699% 0,599%	0,006	0,861	3010	2554	0,893% 0,793% 0,780%	0,008	0,848
ssP-12.2.2	7589	6254	1,260% 1,270% 0,931%	0,012	0,824	4918	4157	0,939% 0,537% 1,170%	0,009	0,845	3022	2563	0,813% 0,923% 0,763%	0,008	0,848

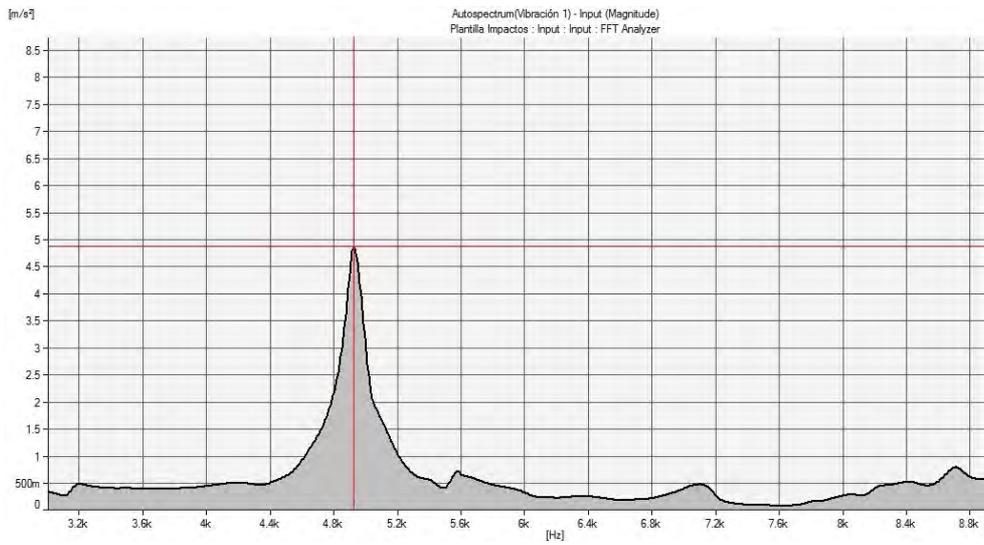
Apéndice G

Resultados de ensayos FFRF sobre sub-probetas prismáticas 205.100.100

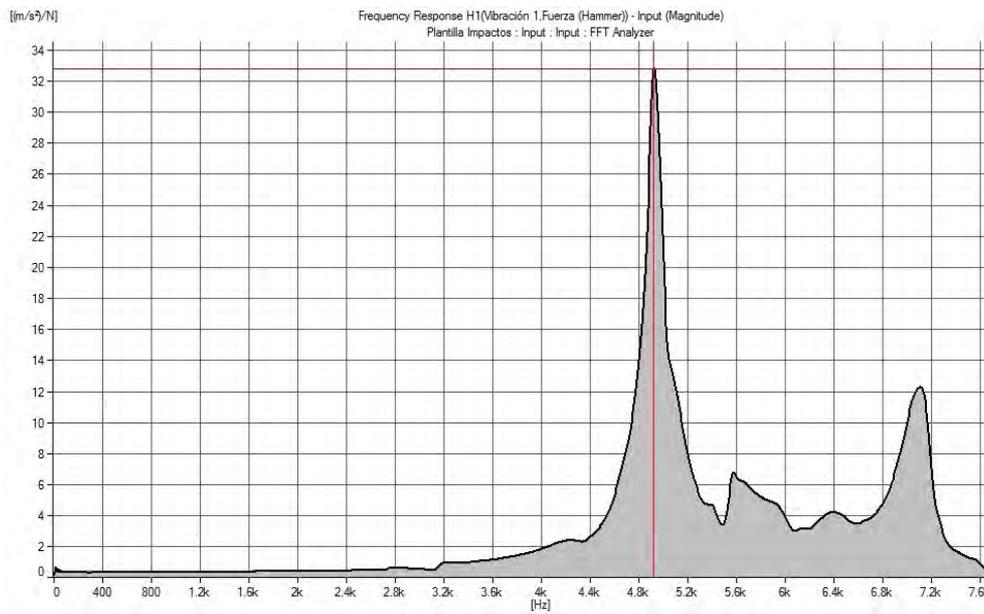
Sub-probeta 1.1.



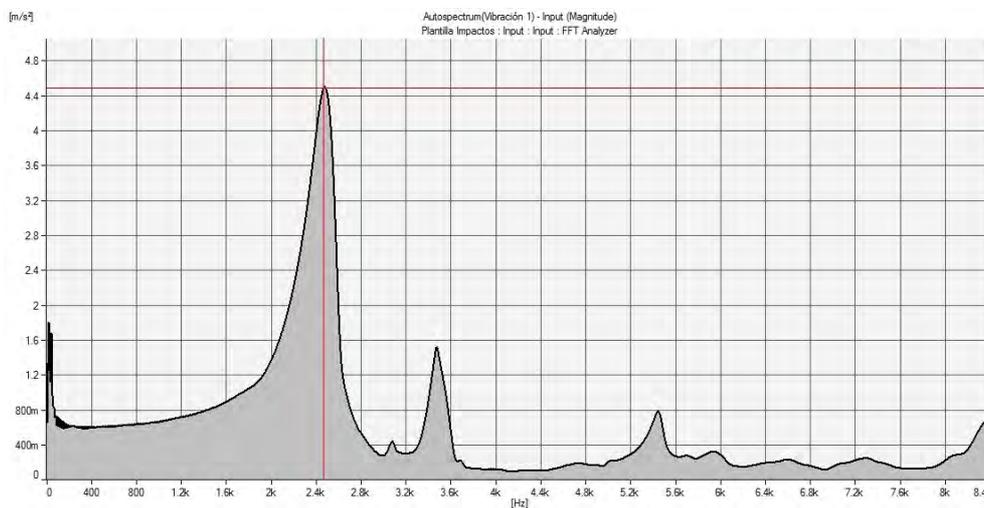
Sub-probeta 1.2.



(d) Modo transversal

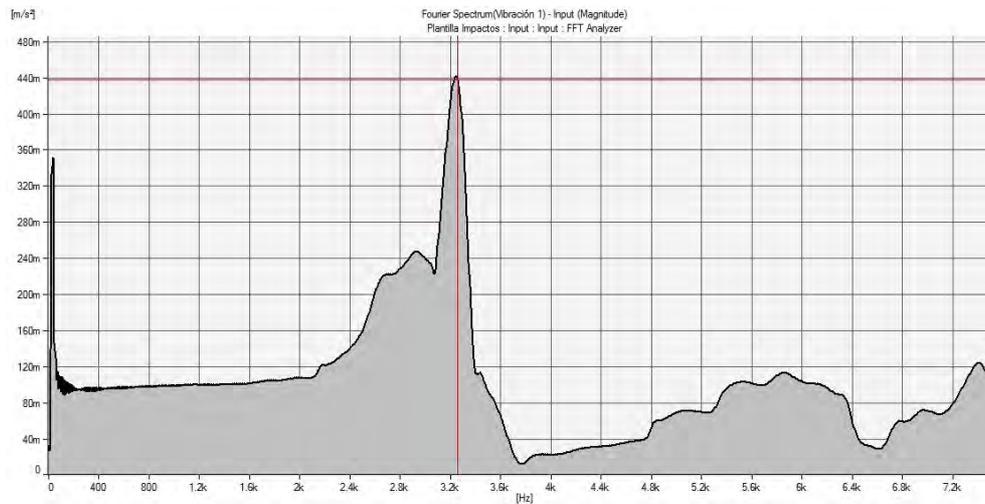


(e) Modo longitudinal

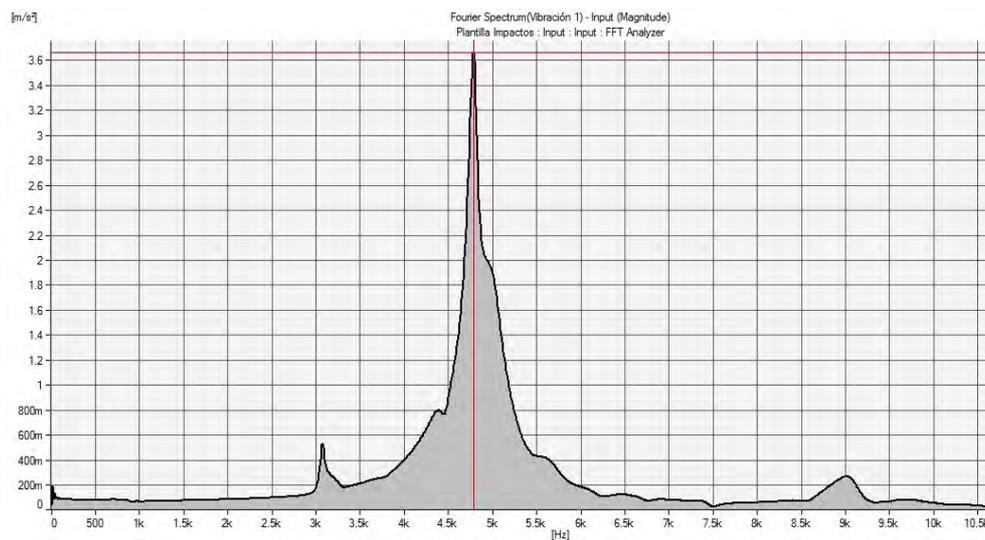


(f) Modo torsional

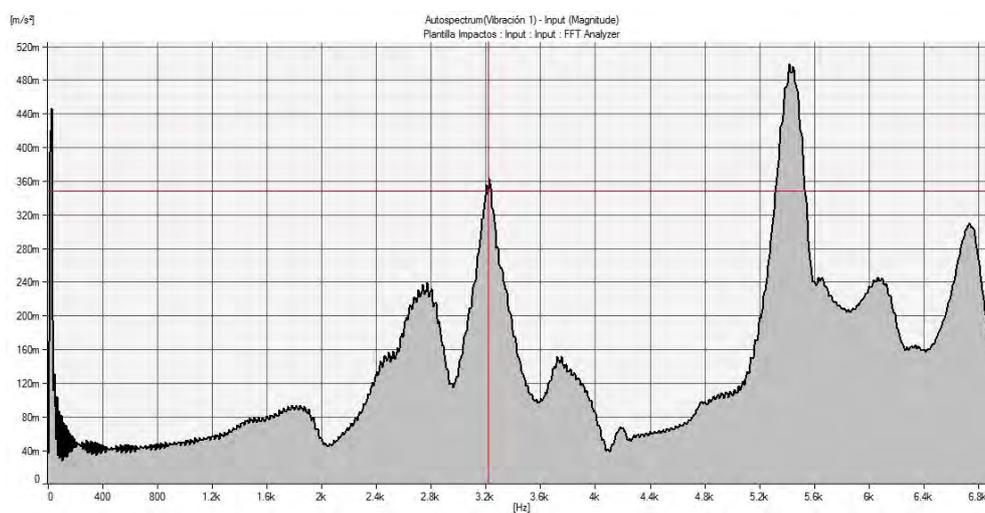
Sub-probeta 3.1.



(g) Modo transversal

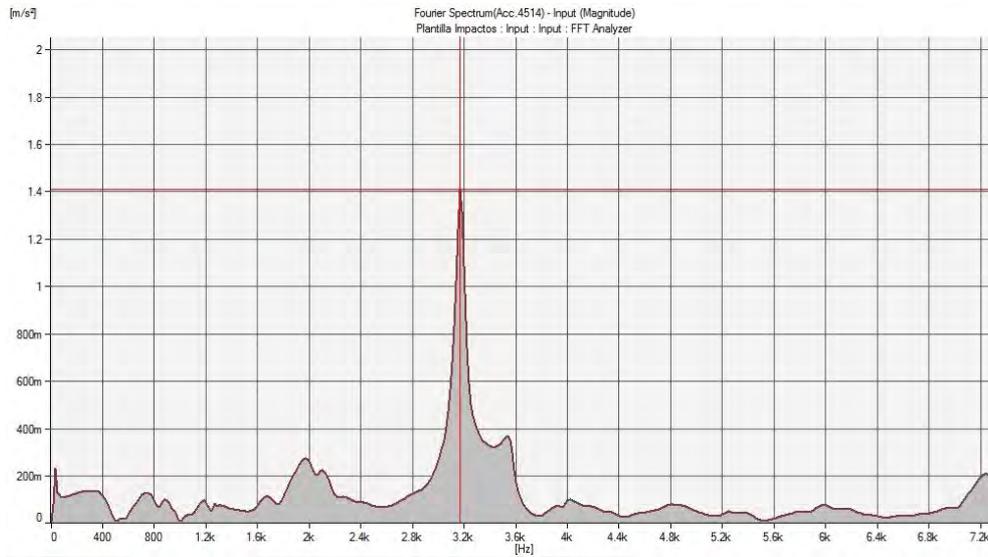


(h) Modo longitudinal

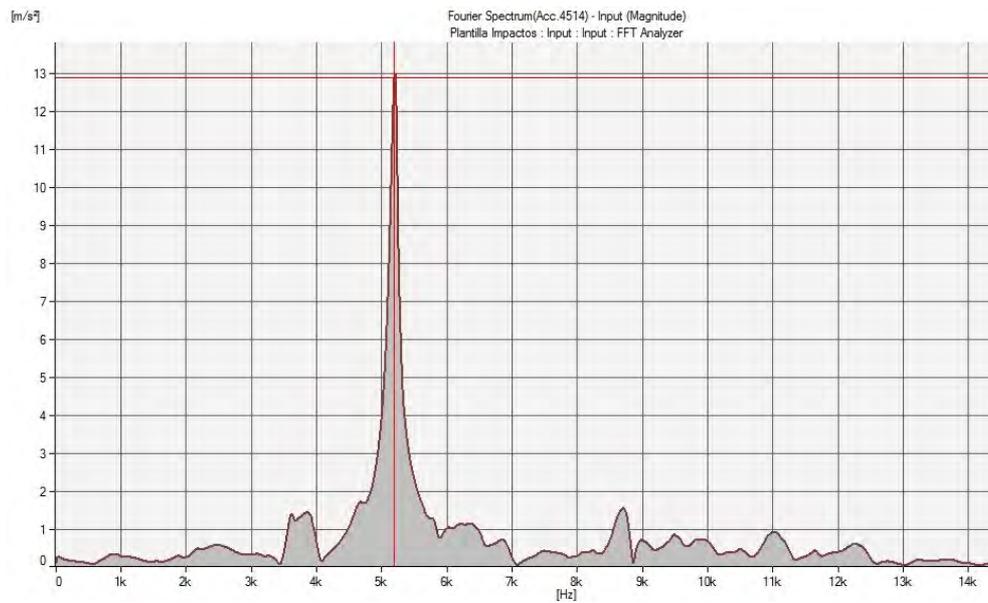


(i) Modo torsional

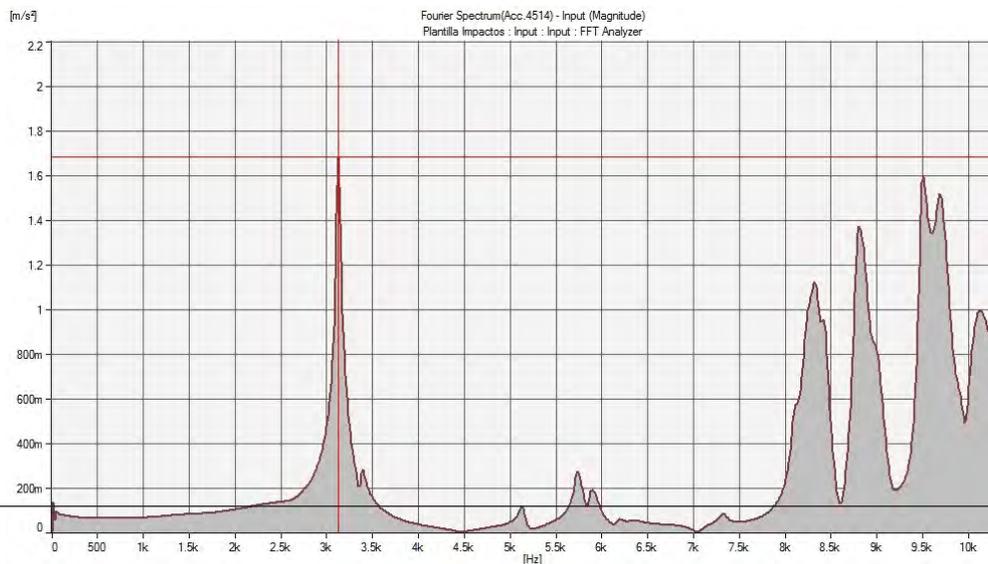
Sub-probeta 6.1.



(j) Modo transversal

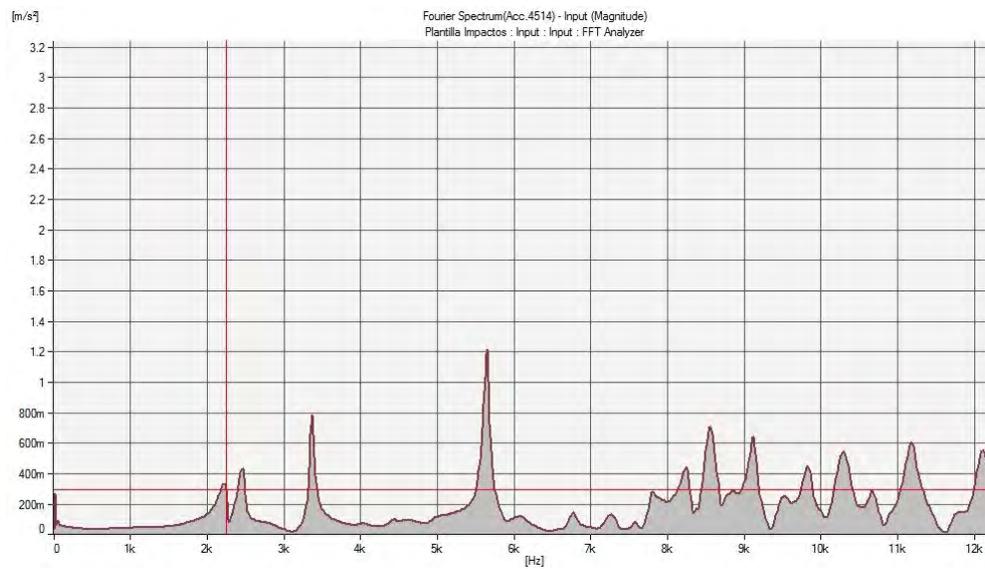


(k) Modo longitudinal

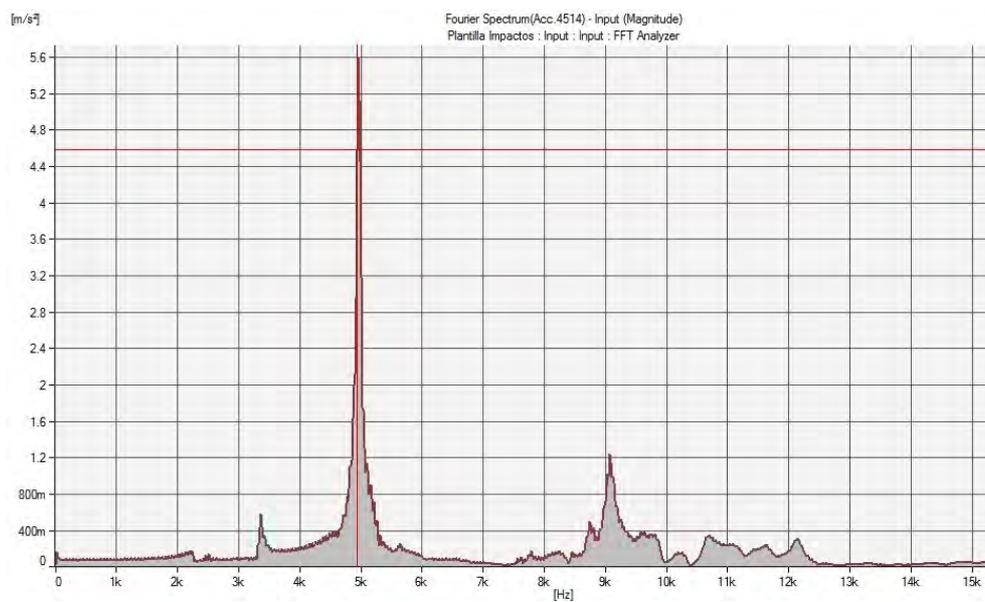


(l) Modo torsional

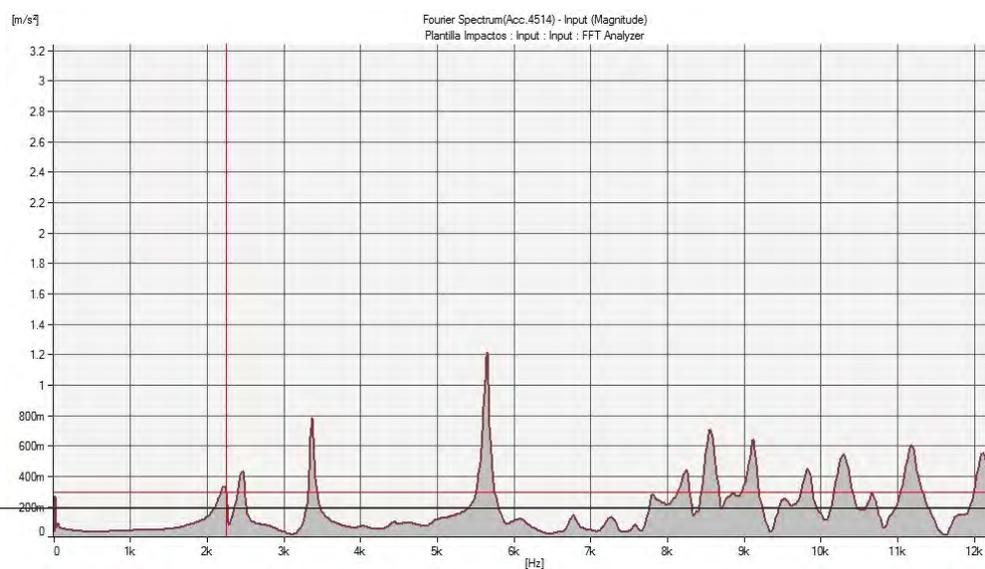
Sub-probeta 6.2.



(m) Modo transversal

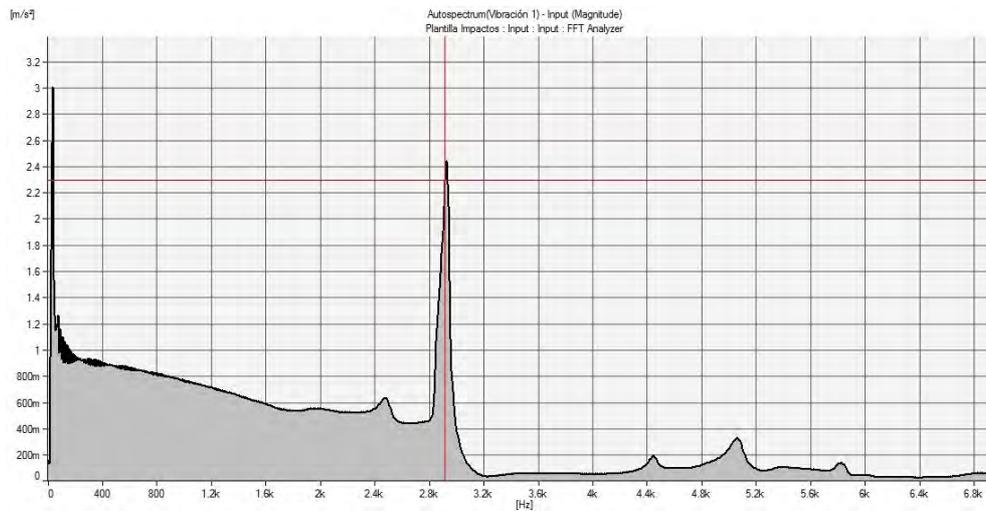


(n) Modo longitudinal

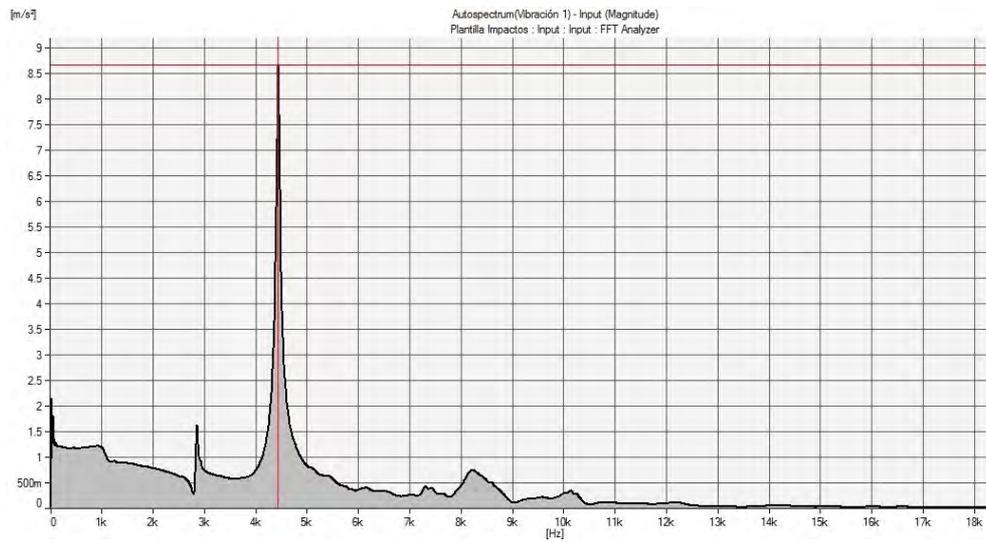


(ñ) Modo torsional

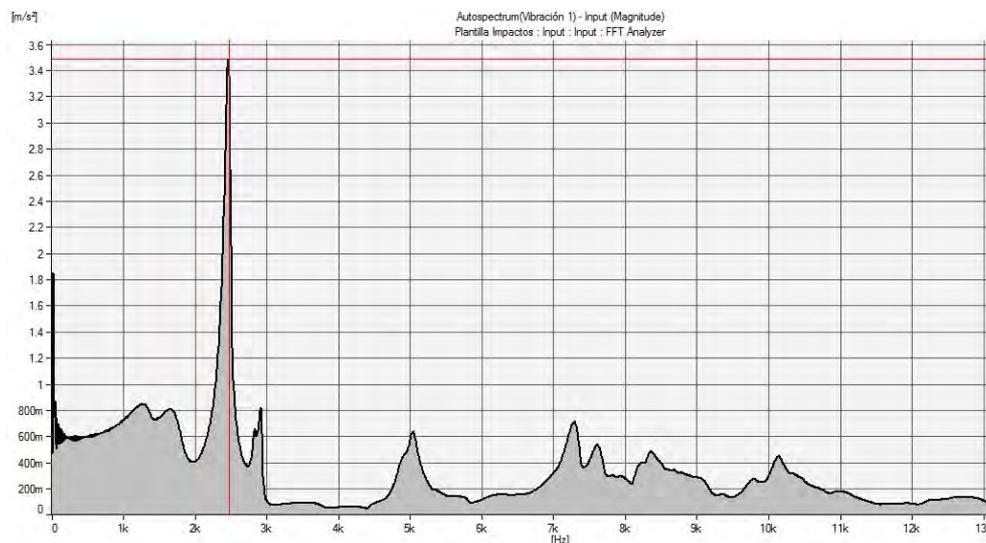
Sub-probeta 7.1.



(o) Modo transversal

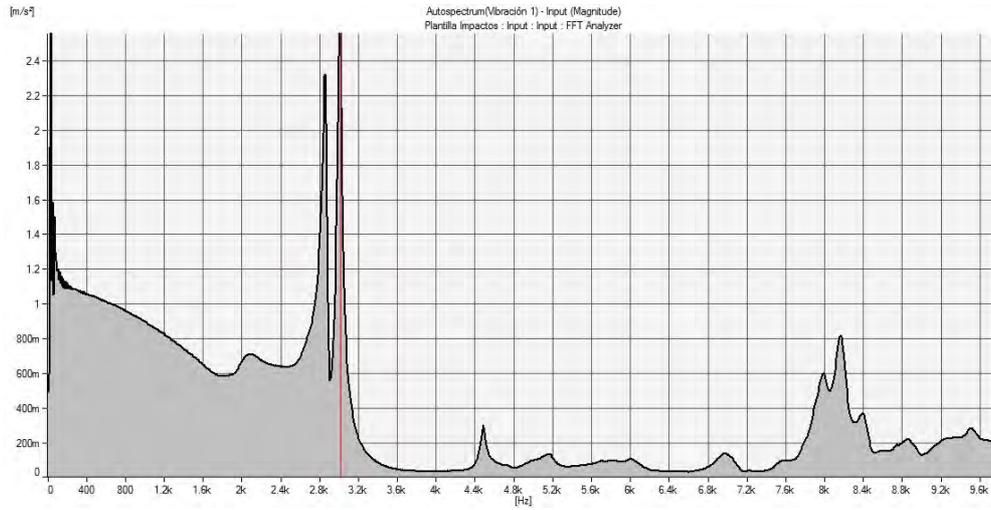


(p) Modo longitudinal

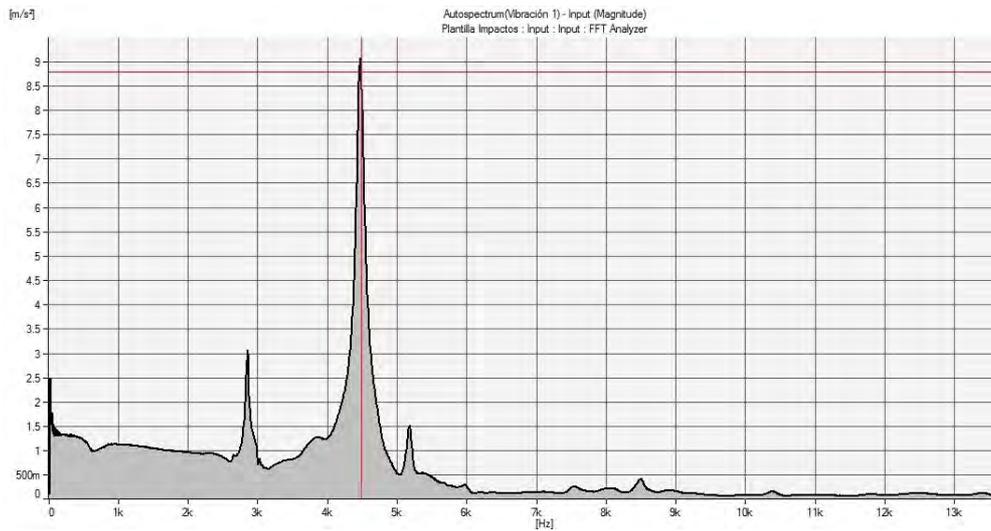


(q) Modo torsional

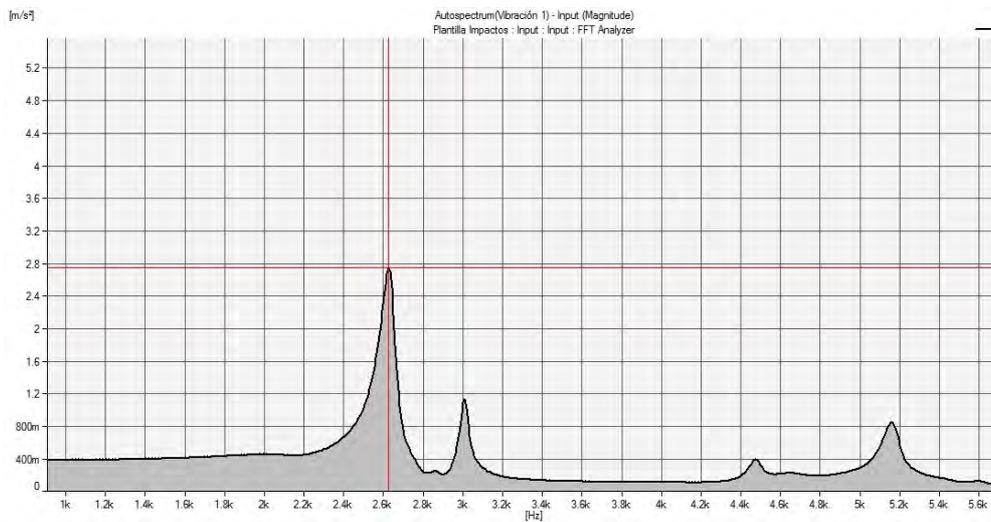
Sub-probeta 7.2.



(r) Modo transversal

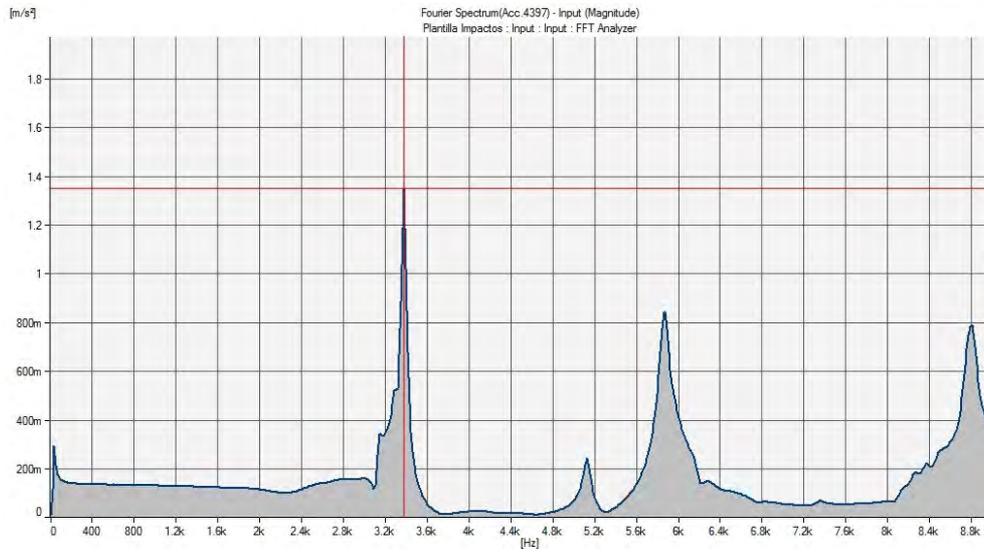


(s) Modo longitudinal

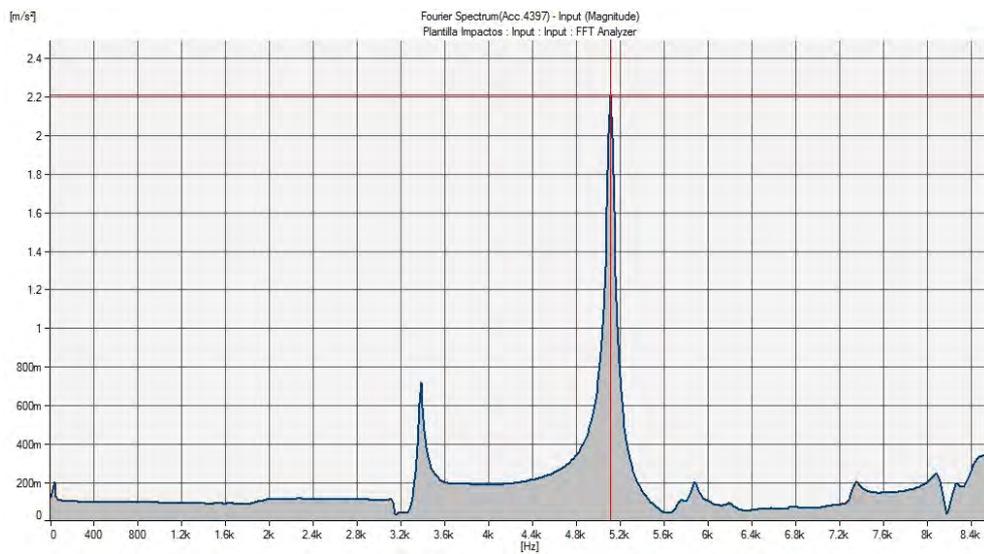


(t) Modo torsional

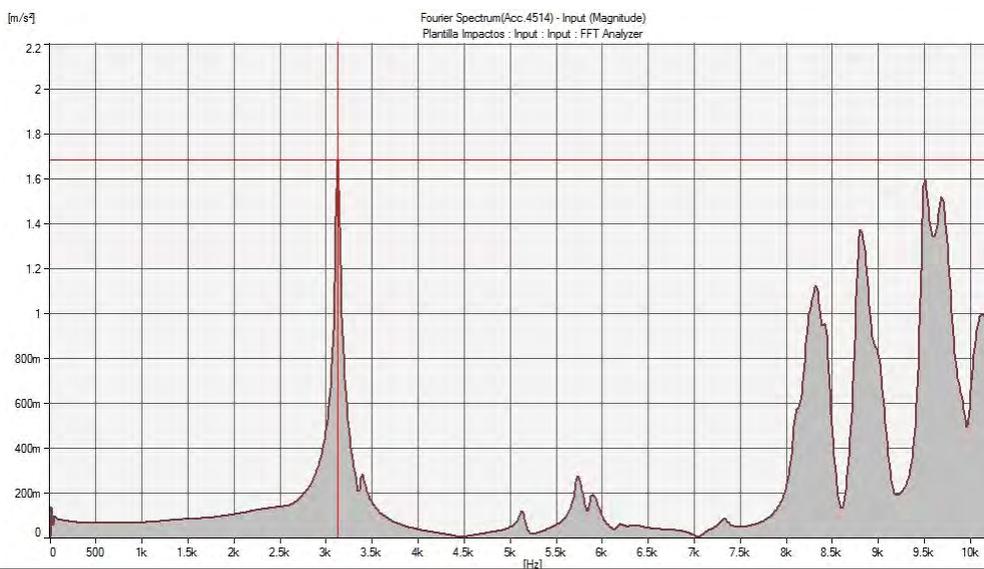
Sub-probeta 9.1.



(u) Modo transversal



(v) Modo longitudinal



(w) Modo torsional

Sub-probeta 9.2.

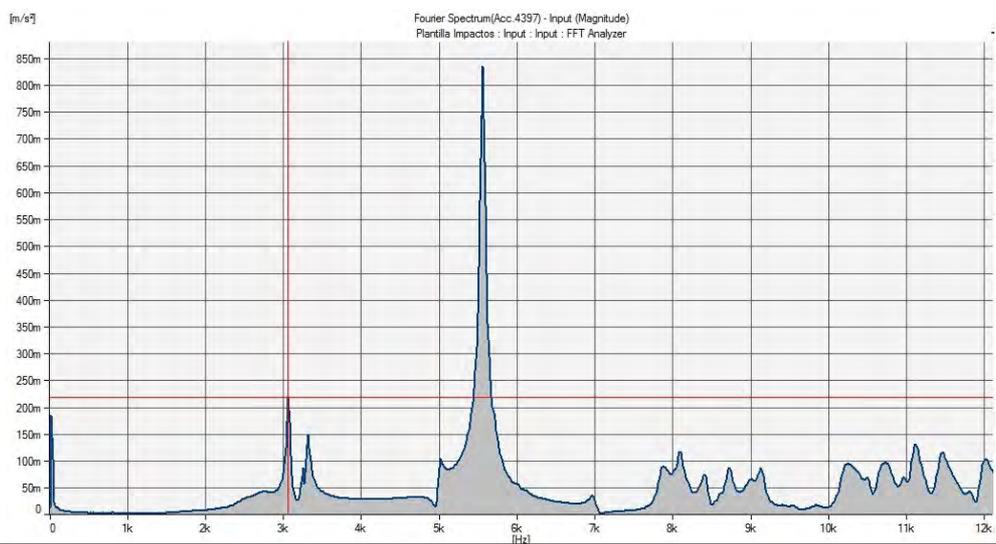
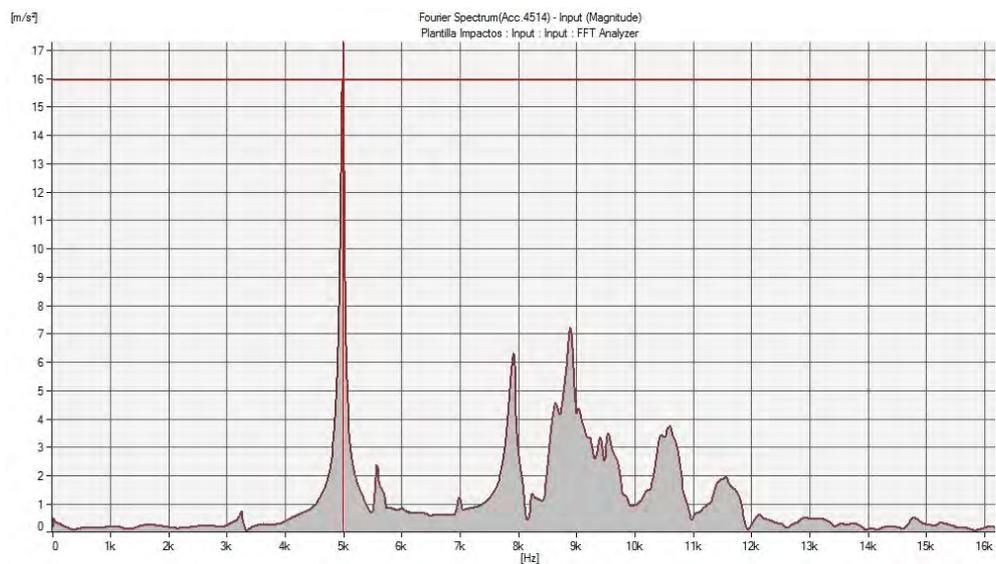
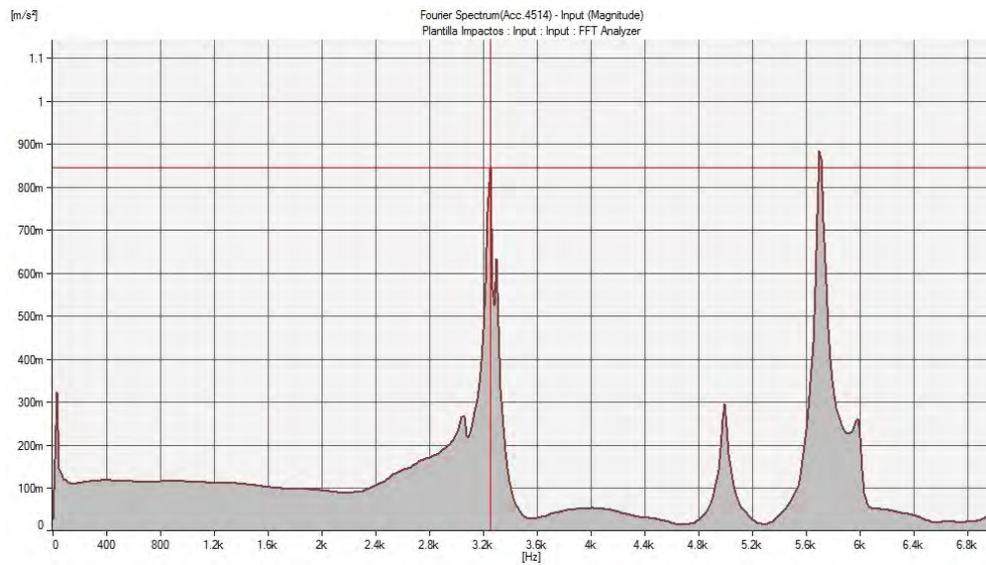
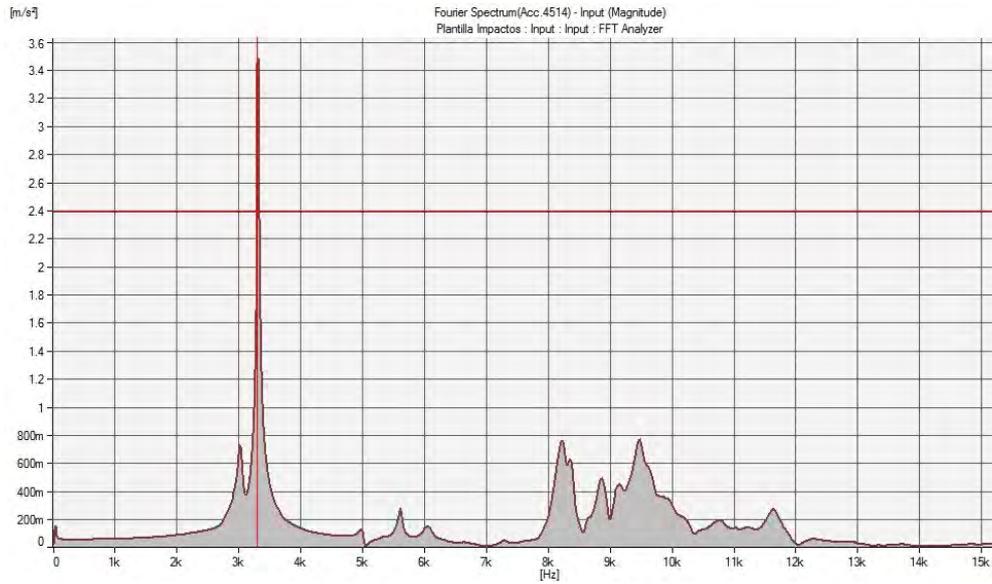
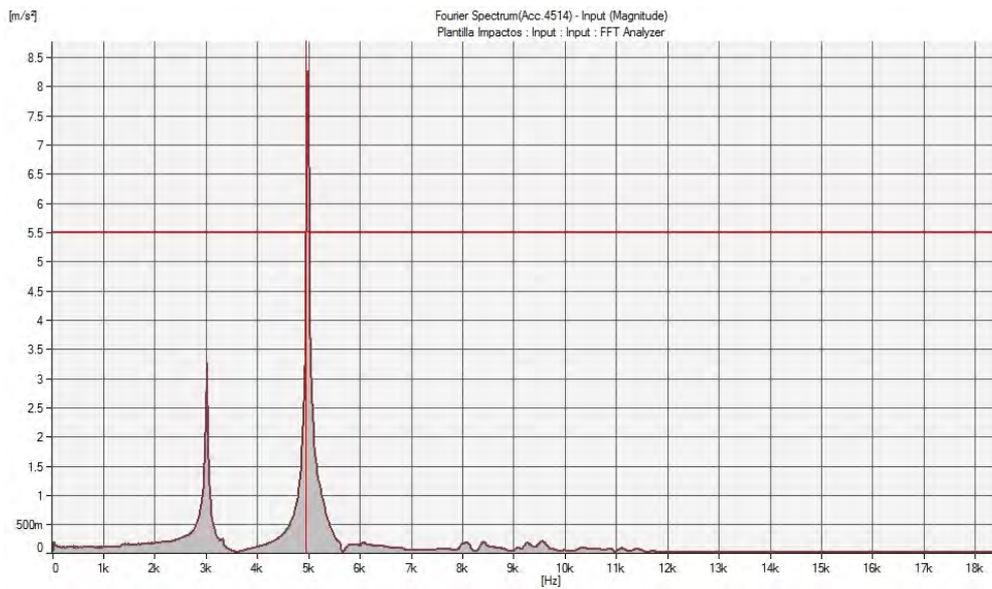


Figura G.1

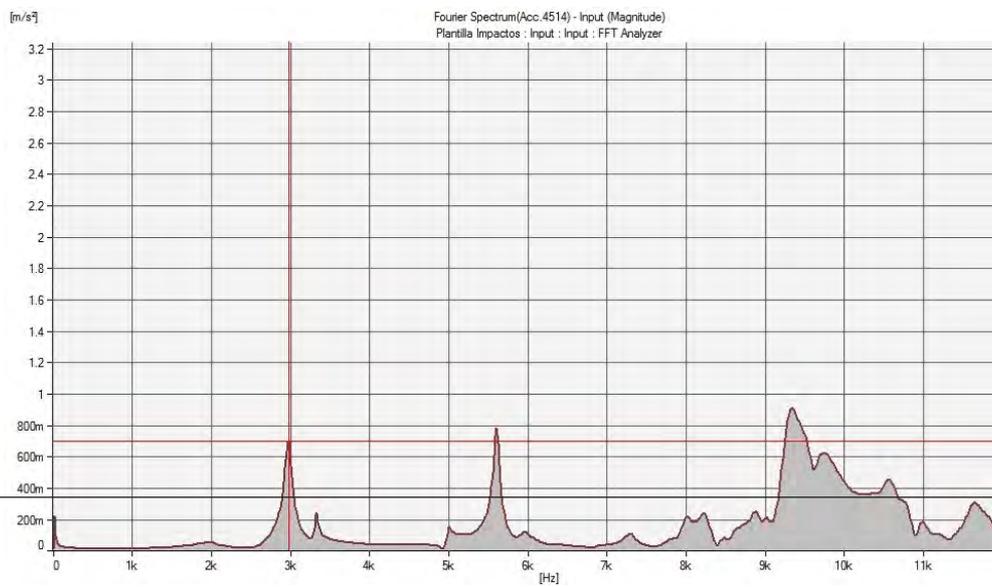
Sub-probeta 10.1.



(a) Modo transversal

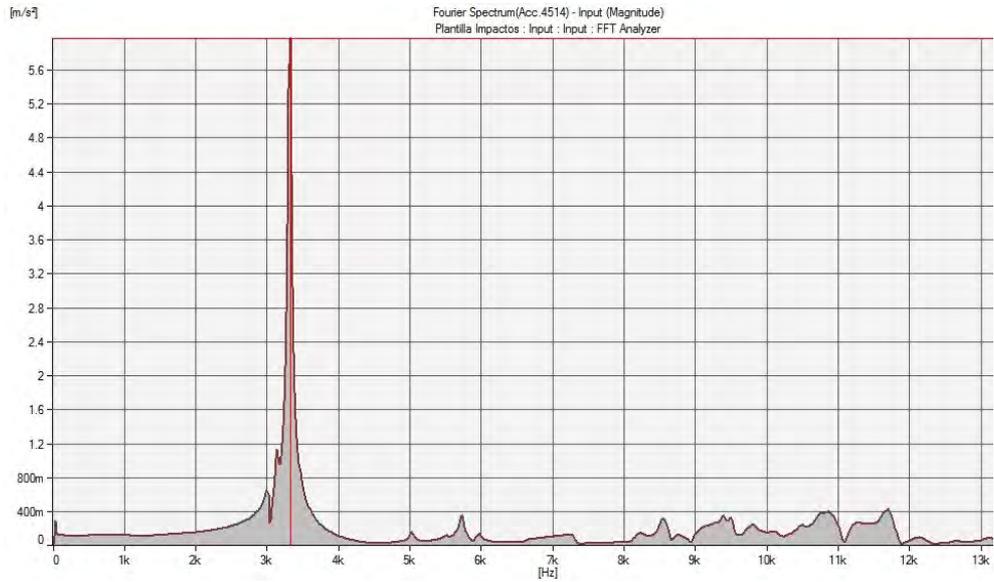


(b) Modo longitudinal

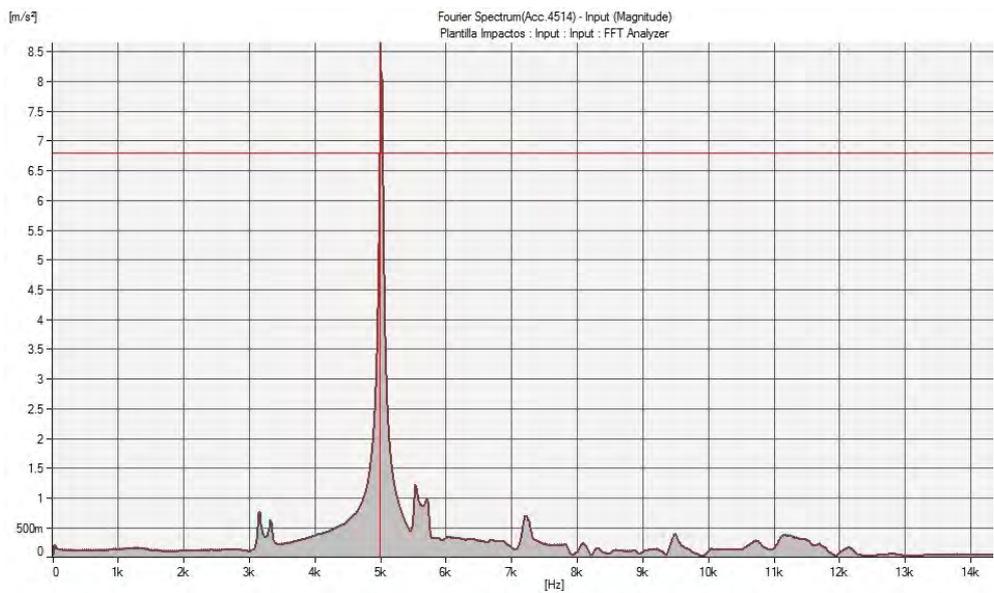


(c) Modo torsional

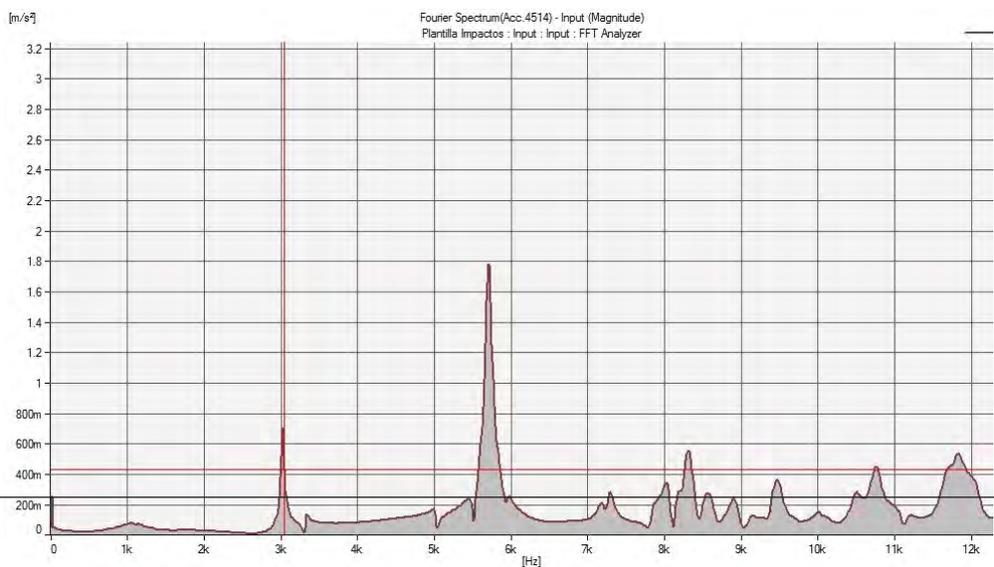
Sub-probeta 10.2.



(d) Modo transversal

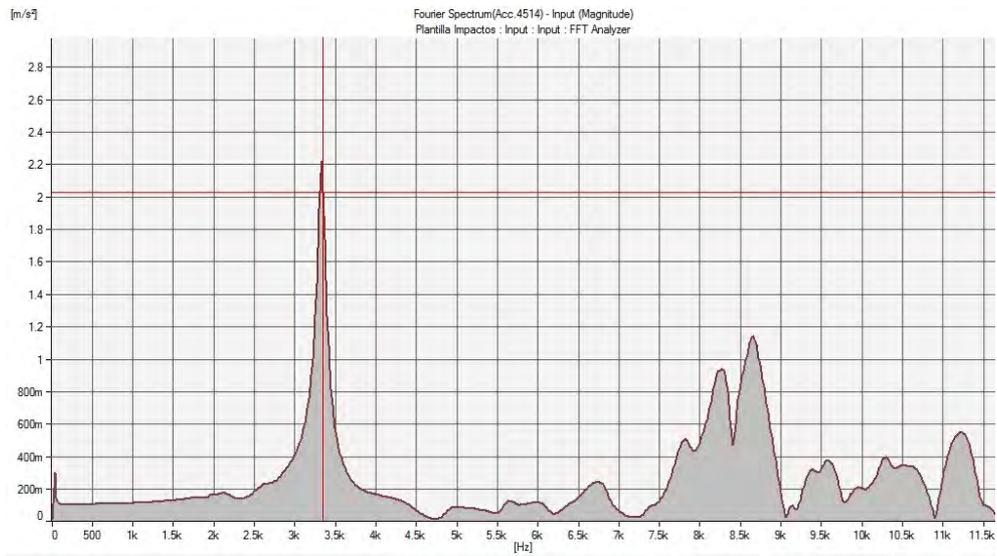


(e) Modo longitudinal

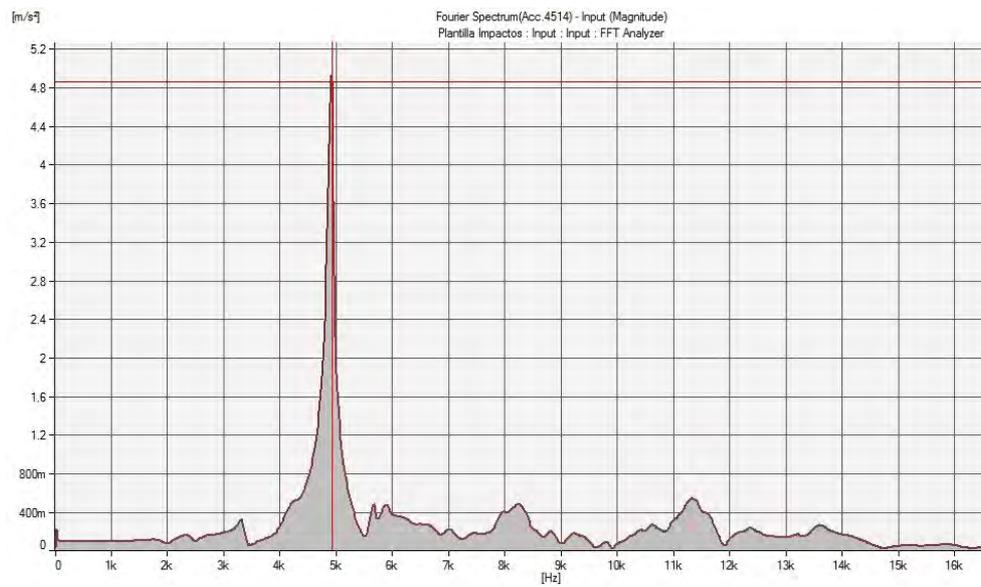


(f) Modo torsional

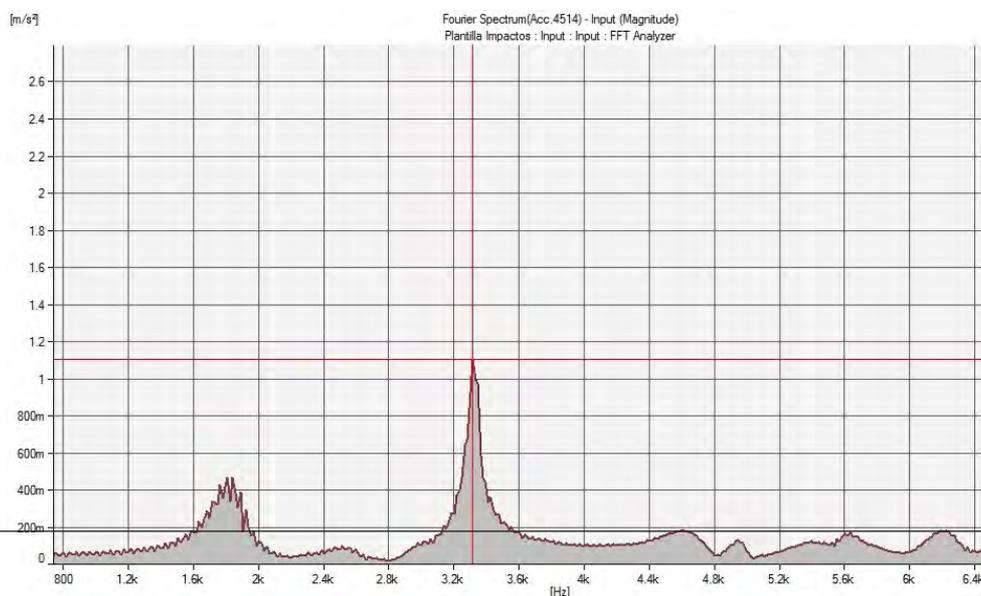
Sub-probeta 11.1.



(g) Modo transversal

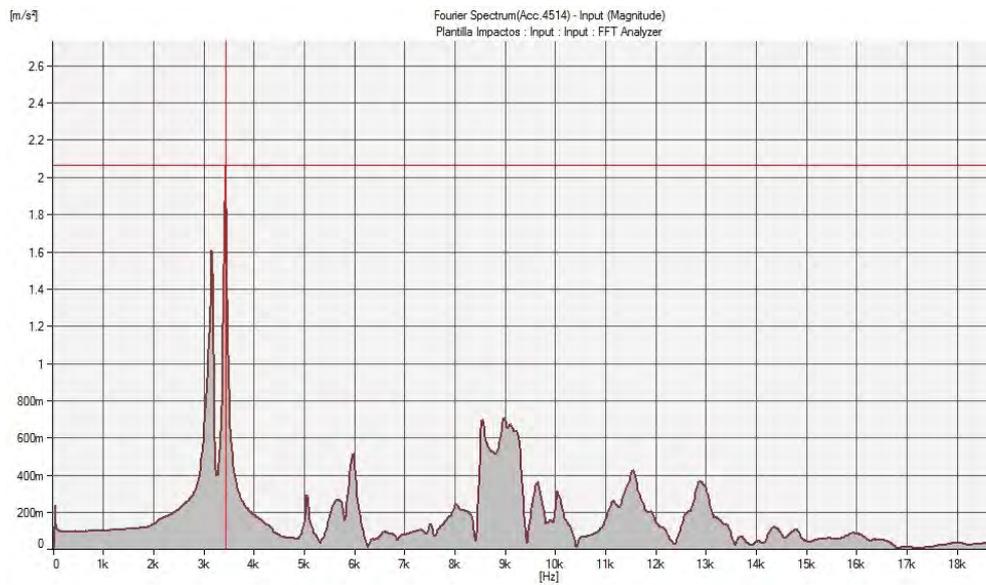


(h) Modo longitudinal

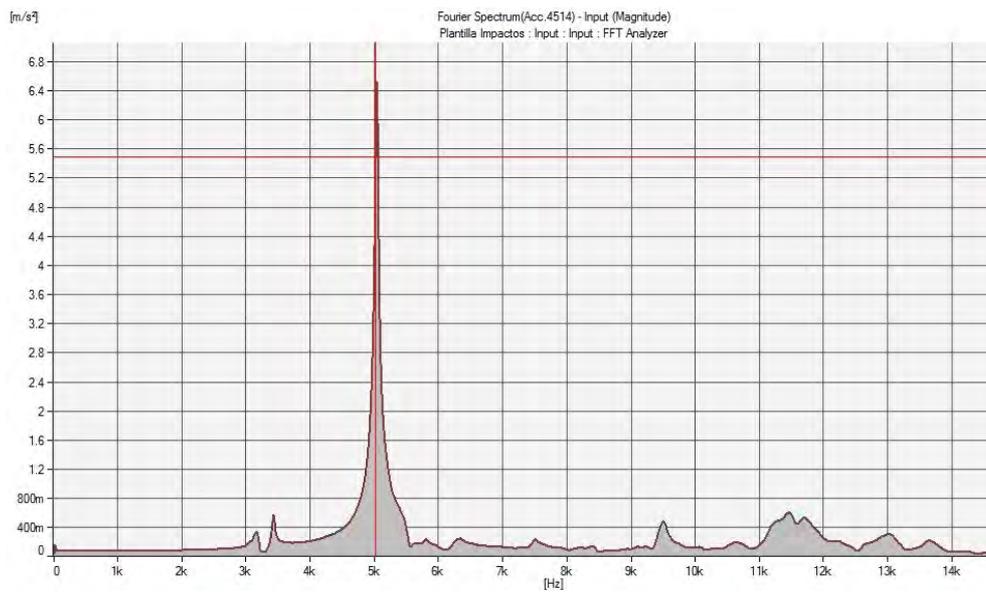


(i) Modo torsional

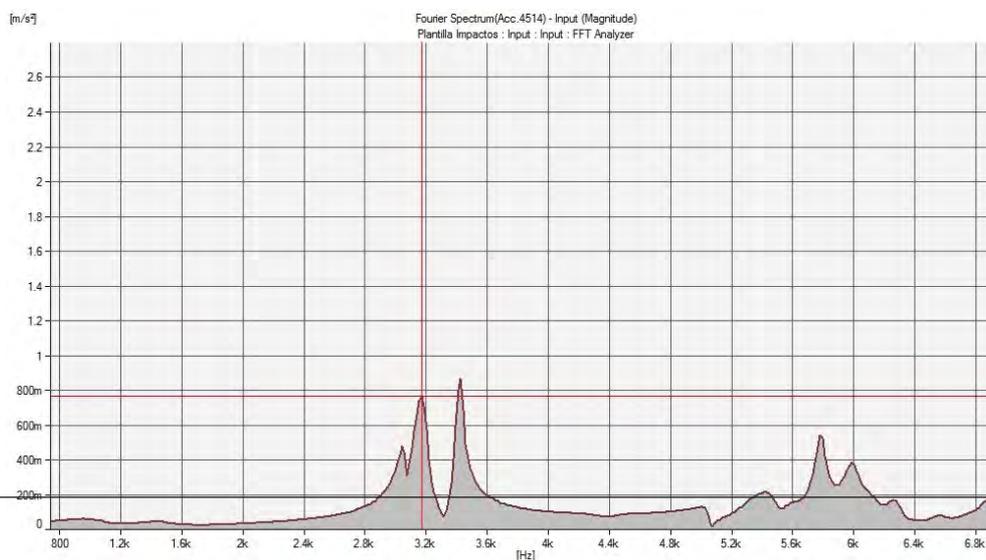
Sub-probeta 11.2.



(j) Modo transversal

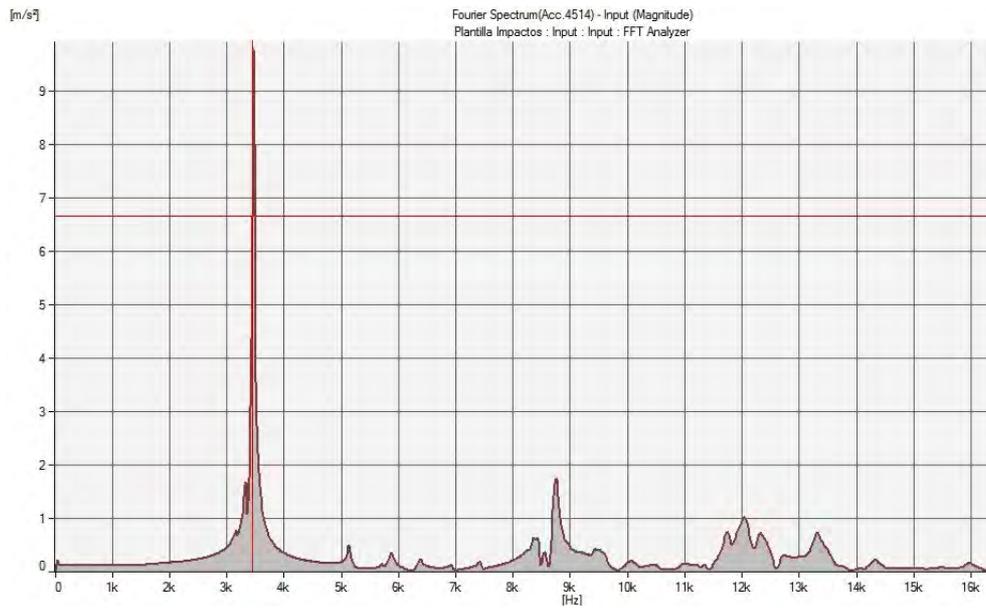


(k) Modo longitudinal

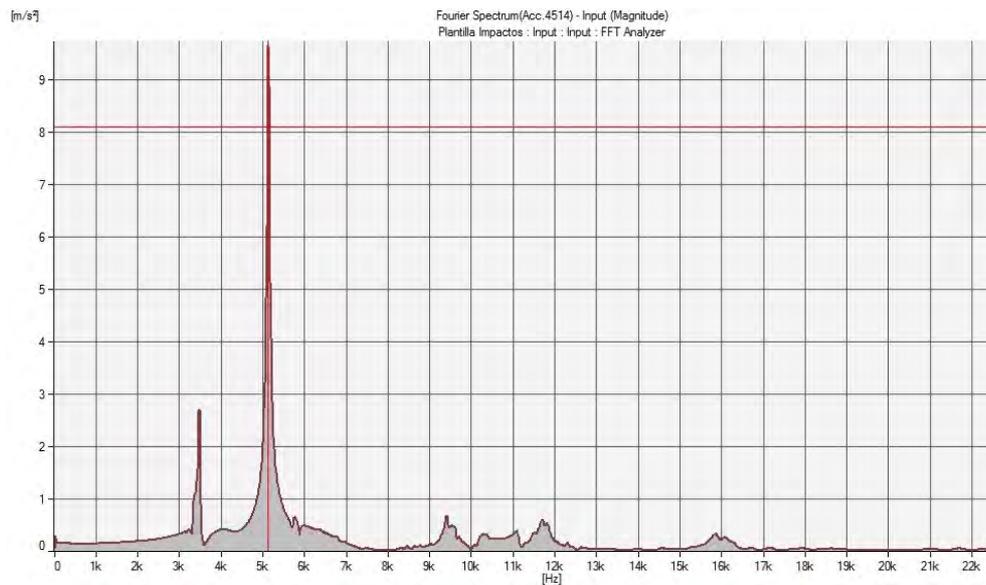


(l) Modo torsional

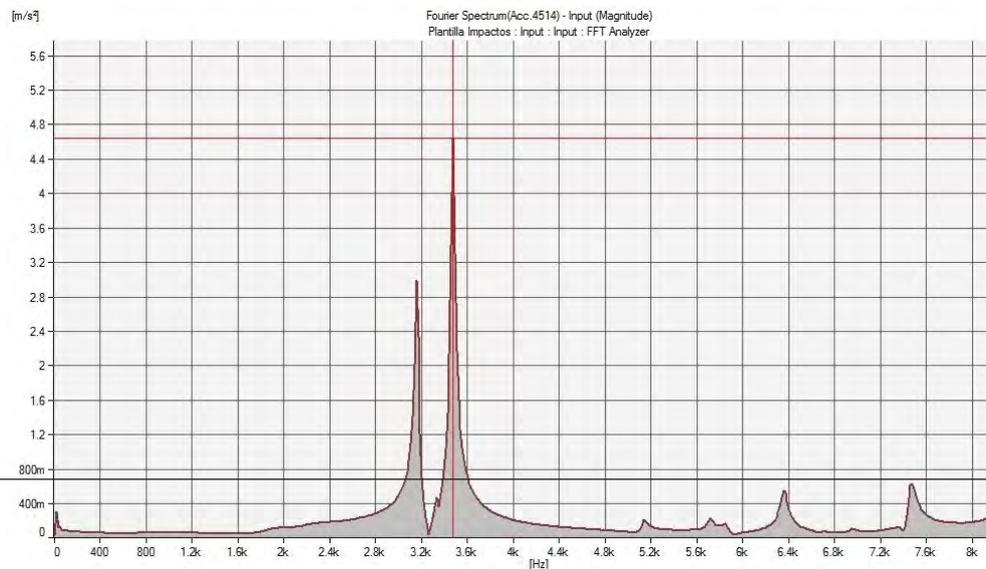
Sub-probeta 12.1.



(m) Modo transversal

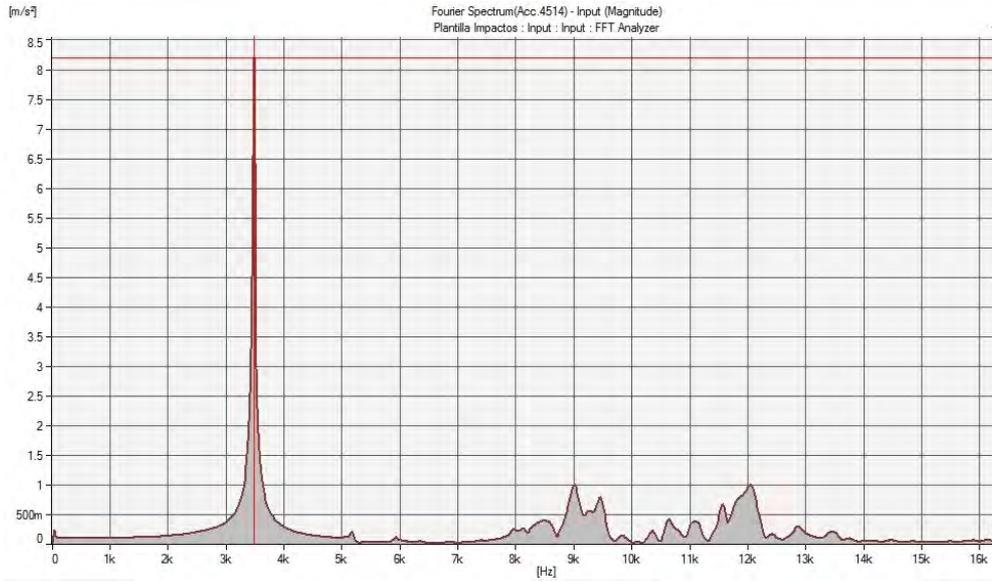


(n) Modo longitudinal

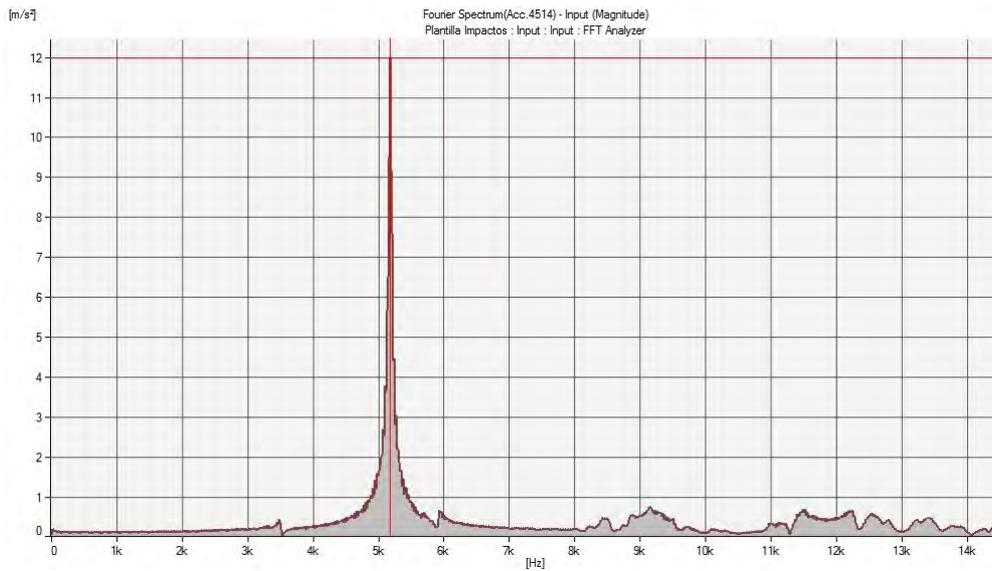


(ñ) Modo torsional

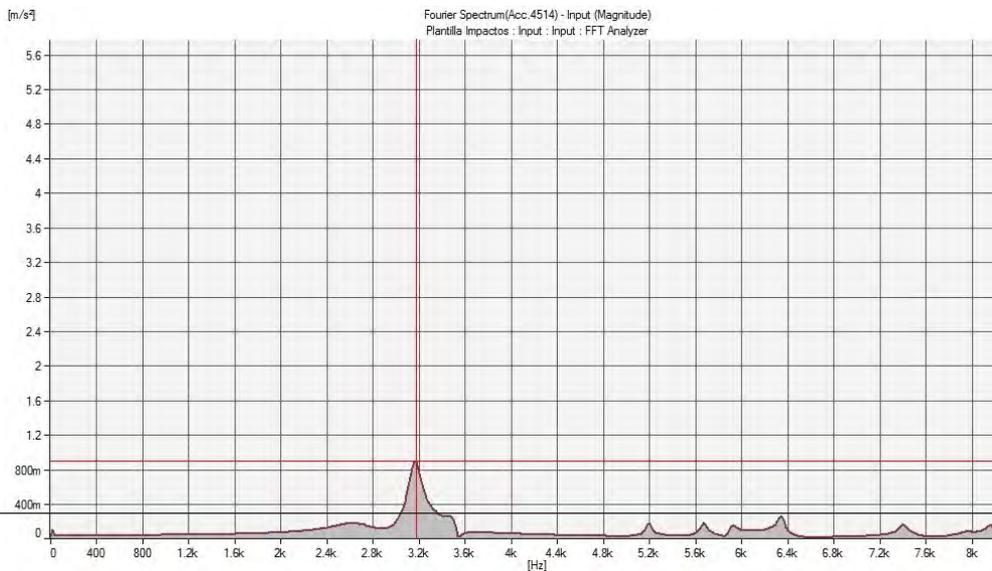
Sub-probeta 12.2.



(o) Modo transversal



(p) Modo longitudinal



(q) Modo torsional

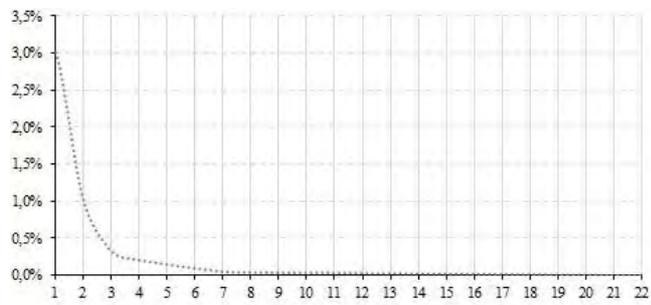
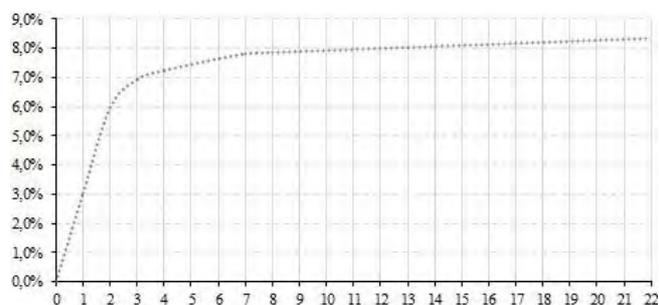
Apéndice H

Cambios de humedad en probetas

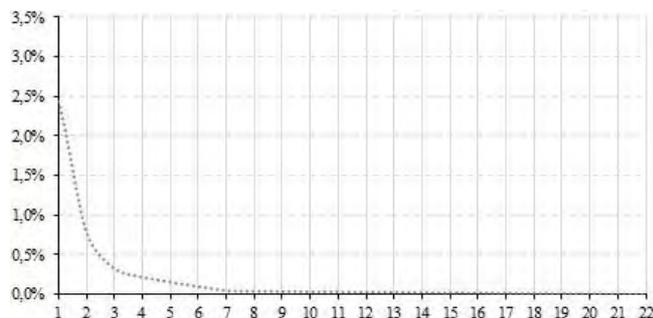
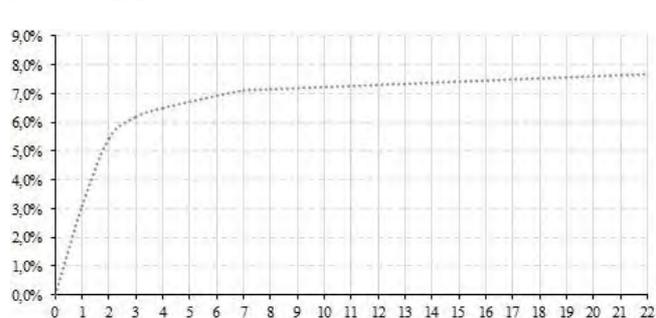
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

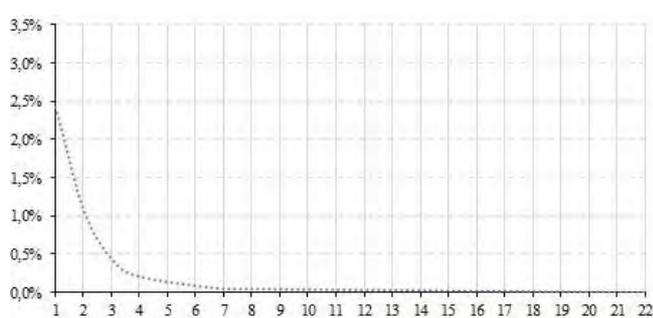
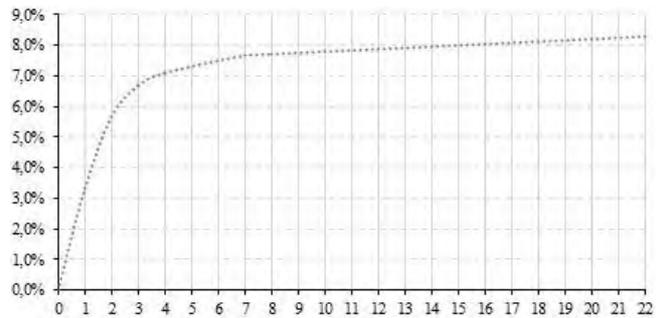
Probeta 1.1



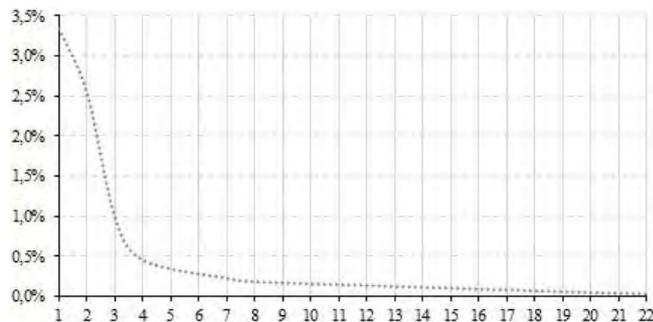
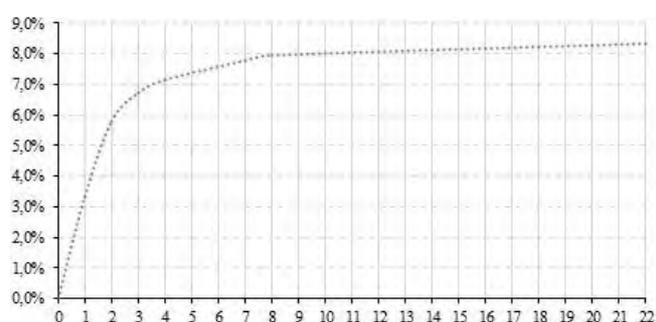
Probeta 1.2



Probeta 1.3



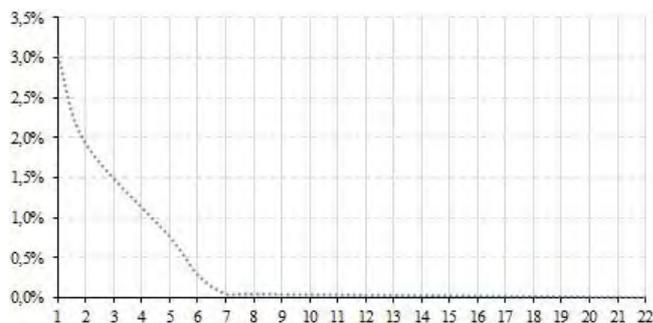
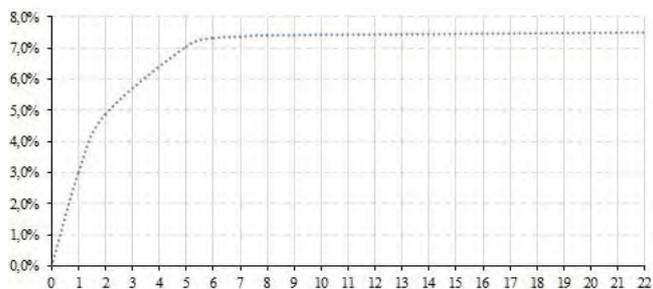
Probeta 1.4



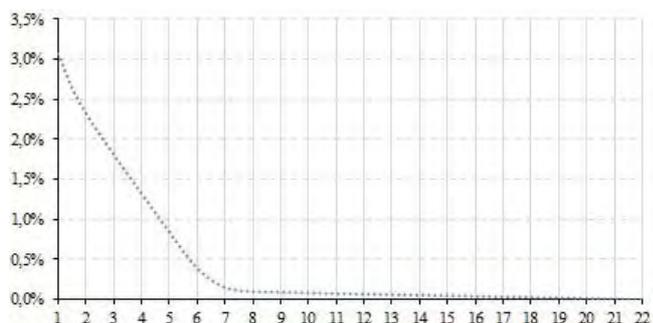
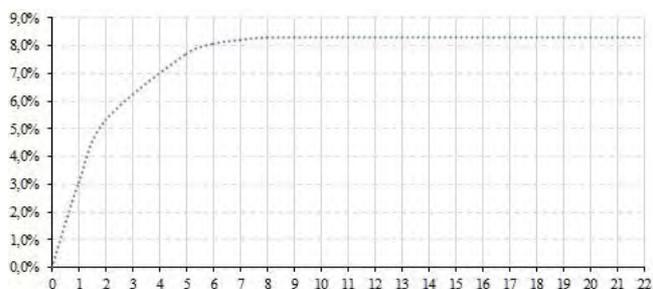
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

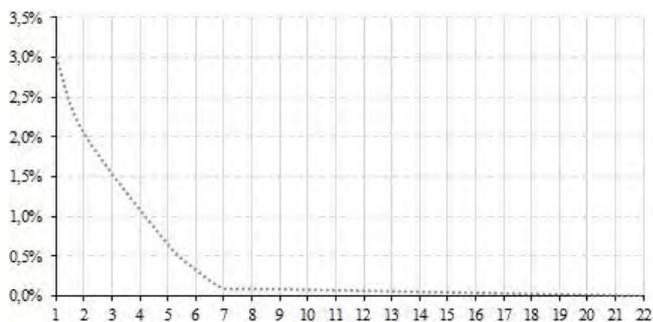
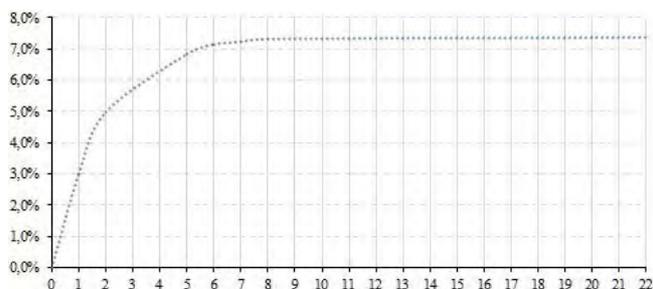
Probeta 2.1



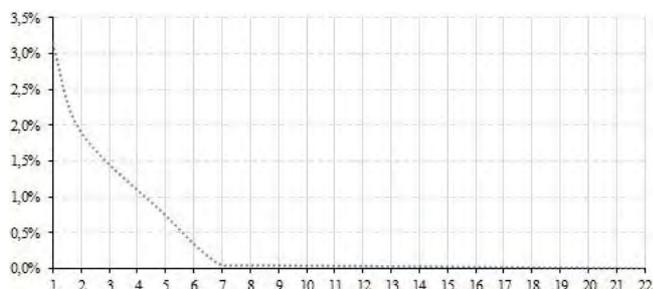
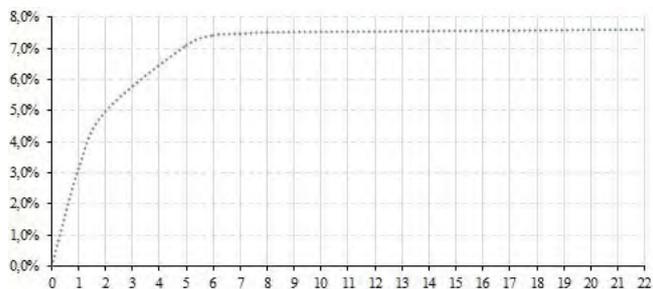
Probeta 2.2



Probeta 2.3



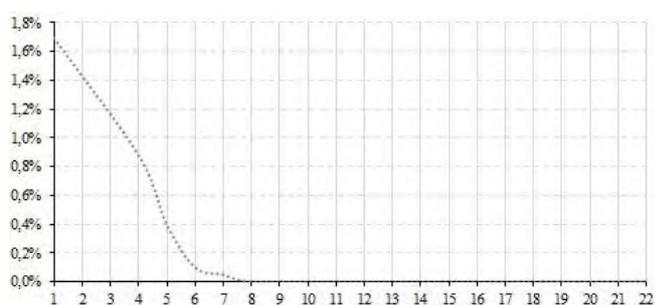
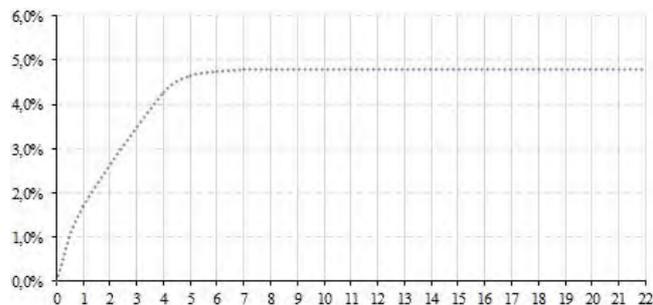
Probeta 2.4



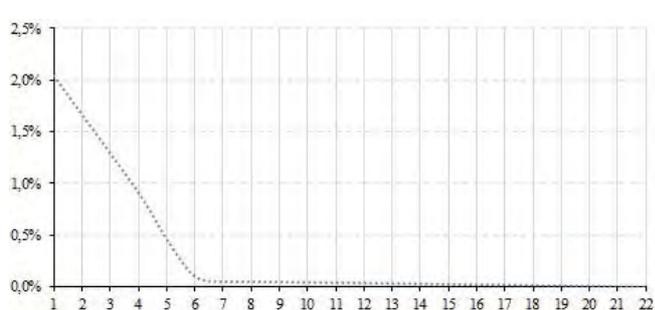
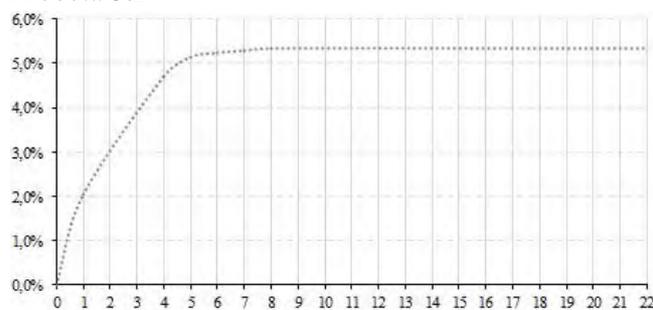
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

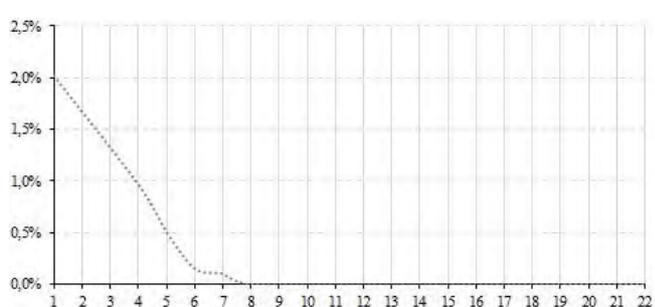
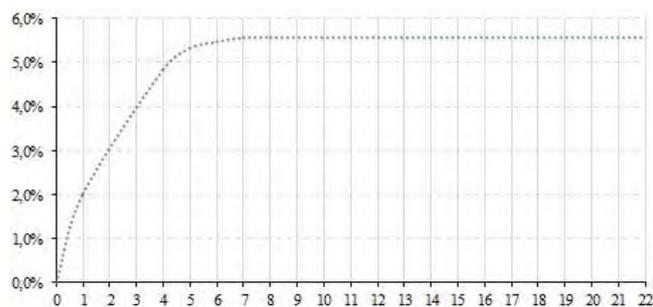
Probeta 3.1



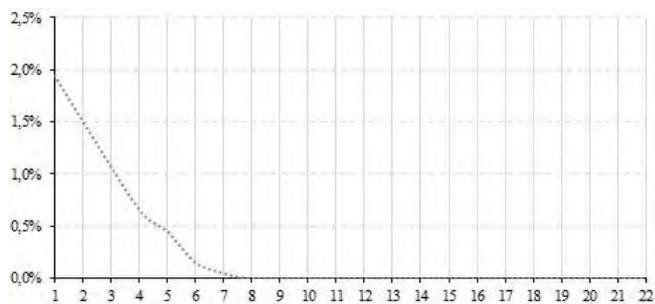
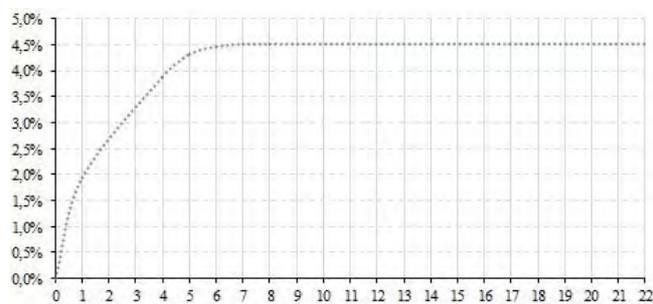
Probeta 3.2



Probeta 3.3



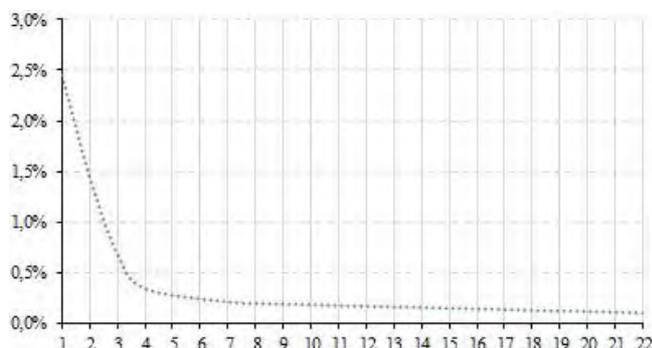
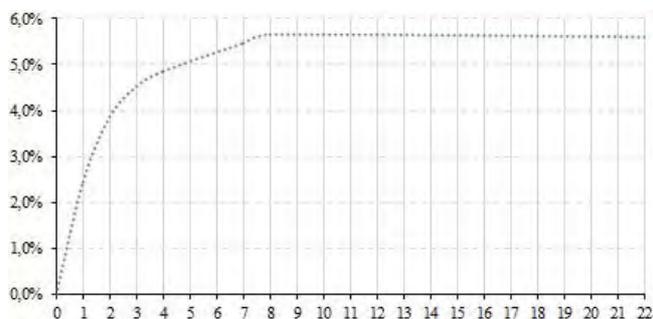
Probeta 3.4



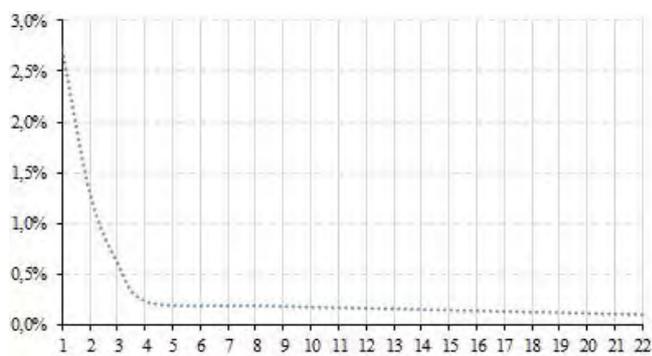
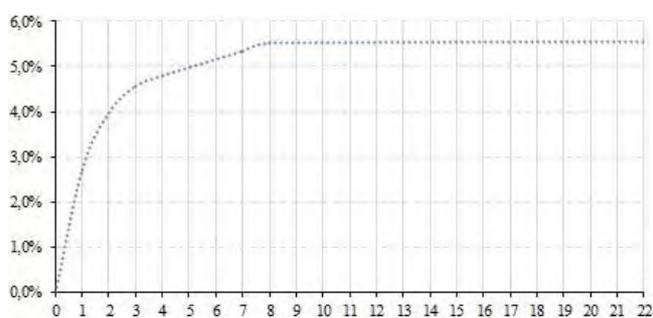
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

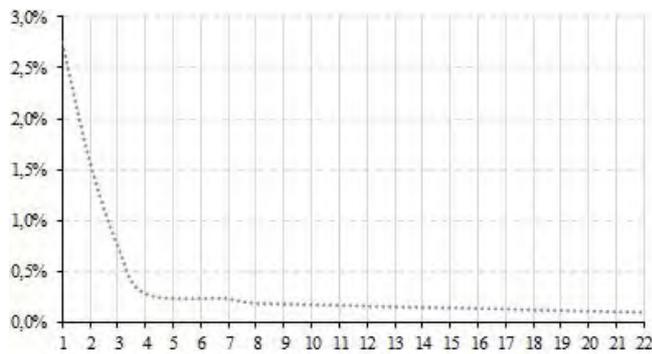
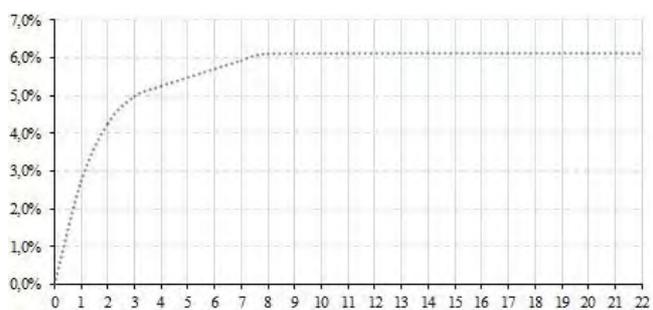
Probeta 4.1



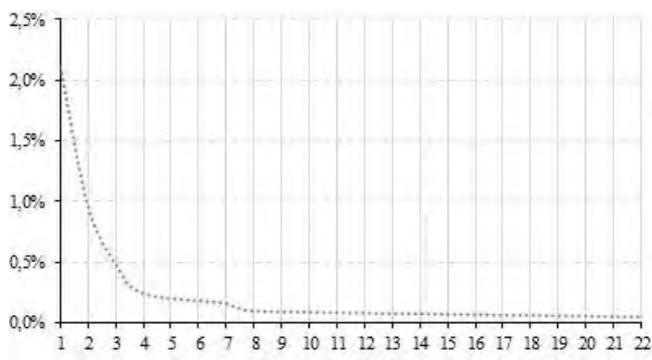
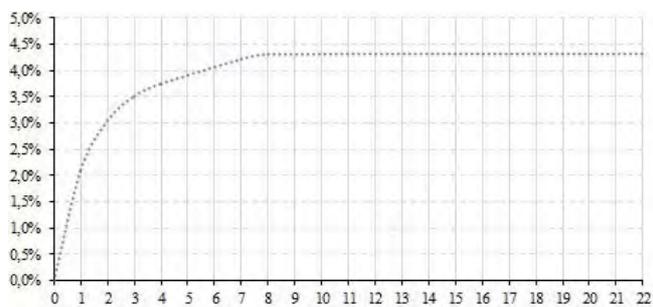
Probeta 4.2



Probeta 4.3



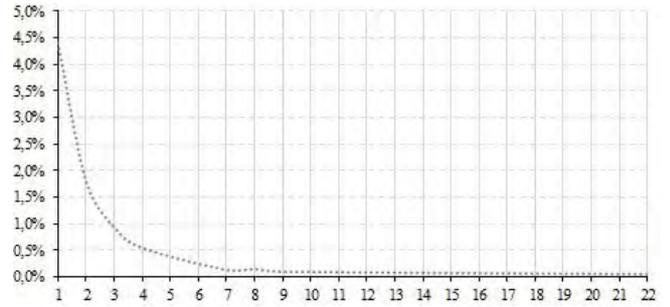
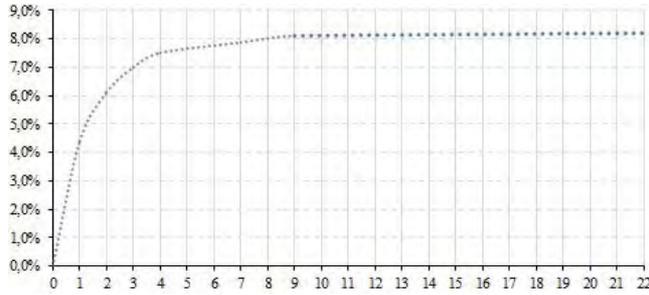
Probeta 4.4



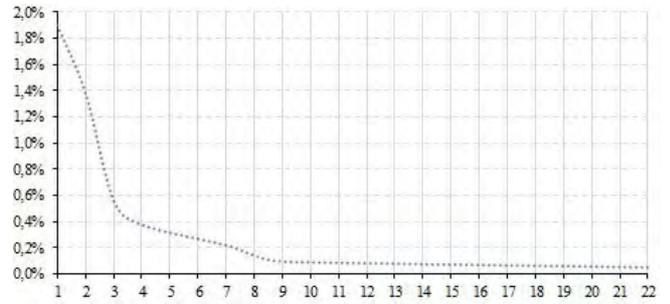
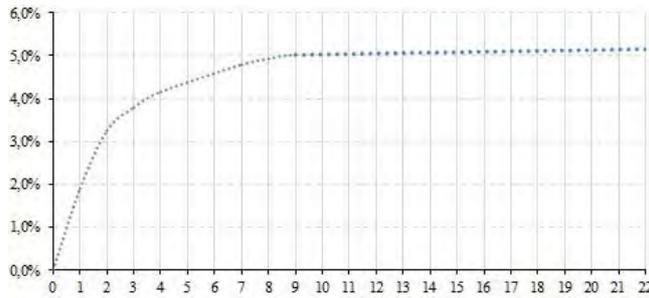
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

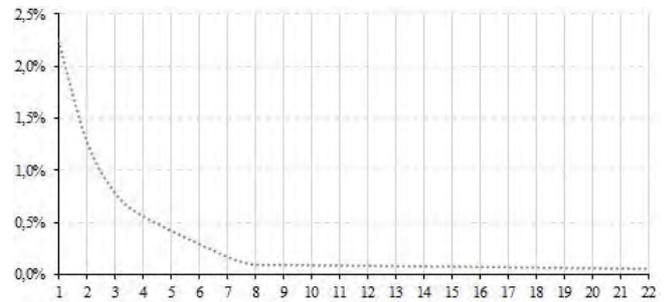
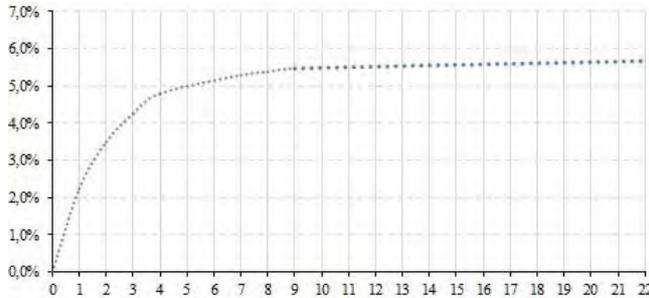
Probeta 5.1



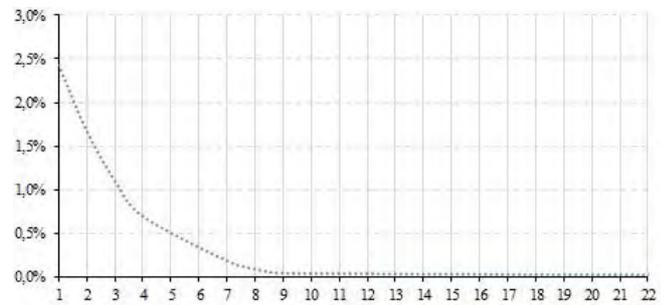
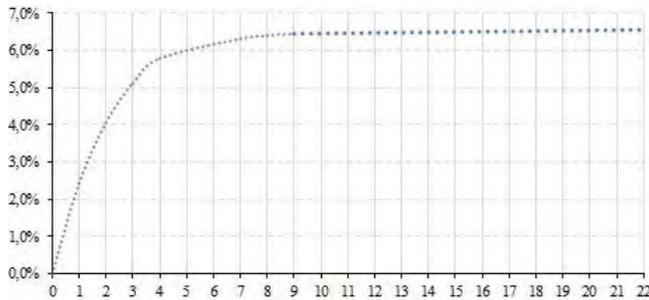
Probeta 5.2



Probeta 5.3



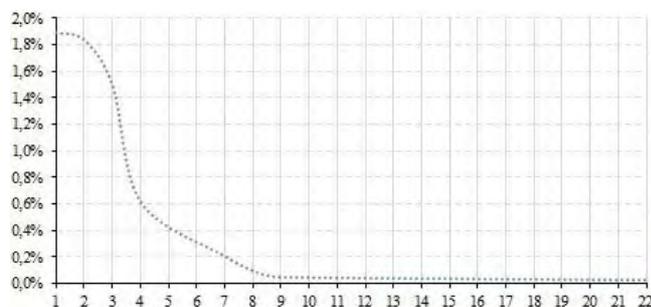
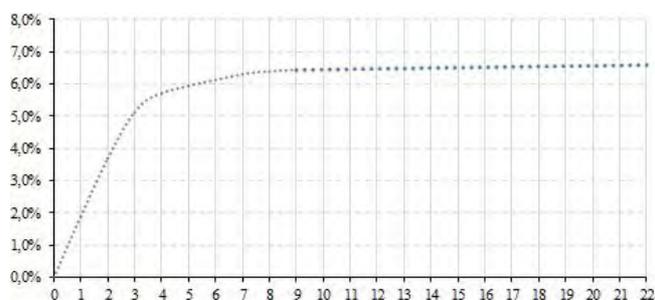
Probeta 5.4



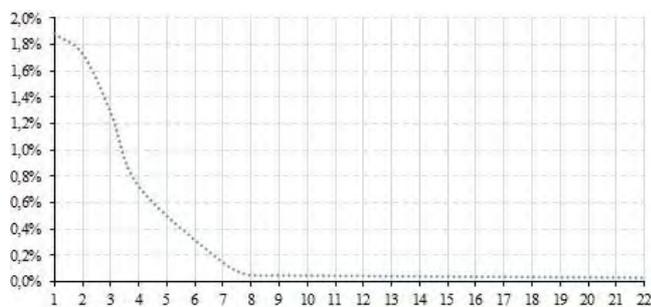
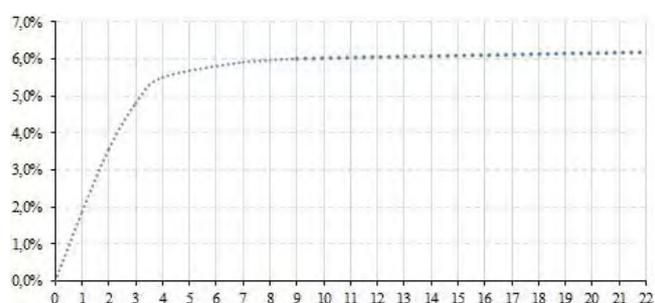
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

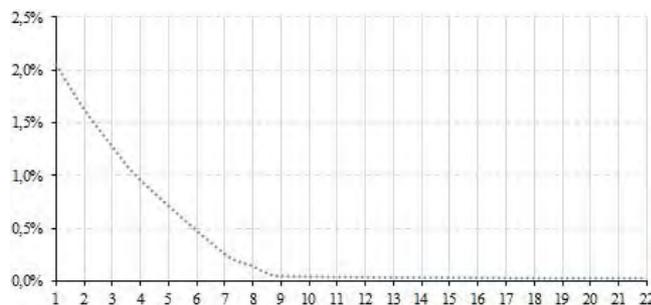
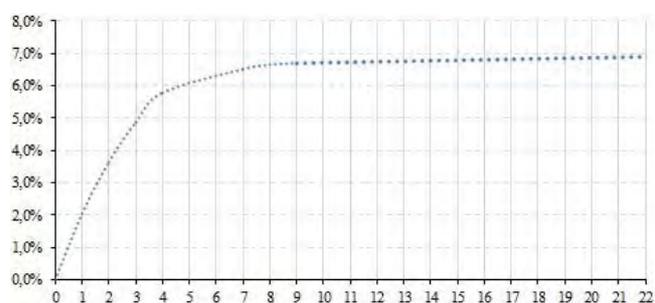
Probeta 6.1



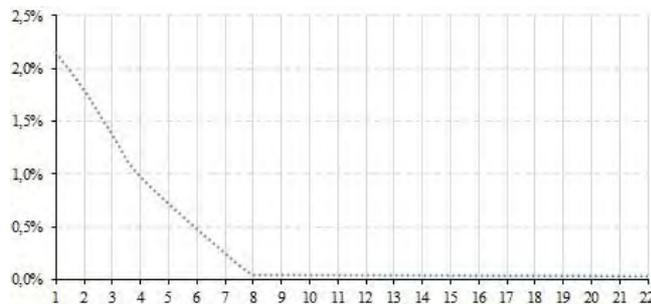
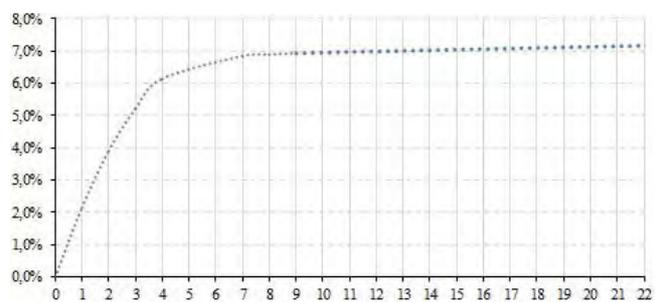
Probeta 6.2



Probeta 6.3



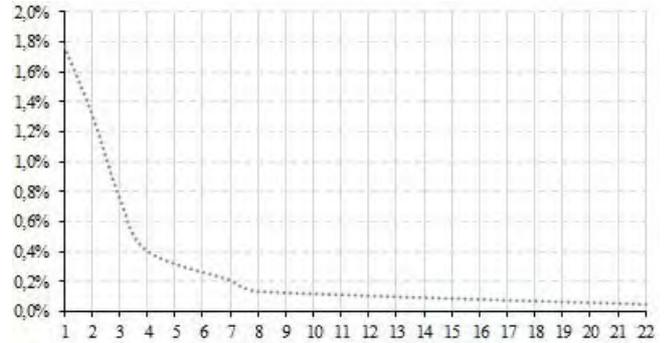
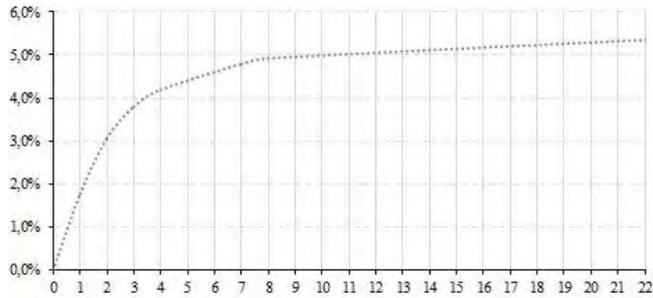
Probeta 6.4



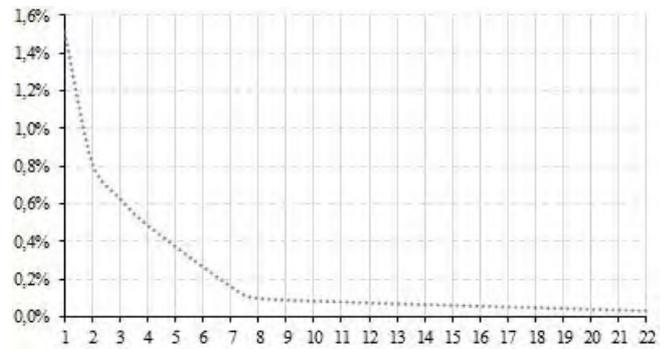
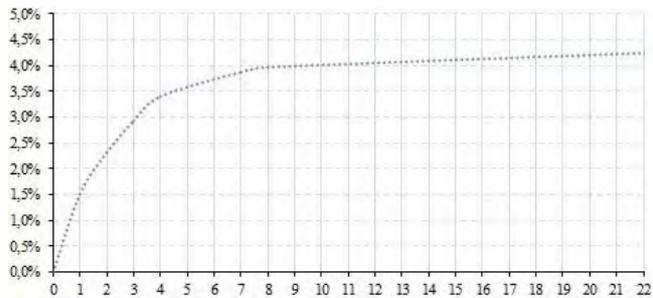
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

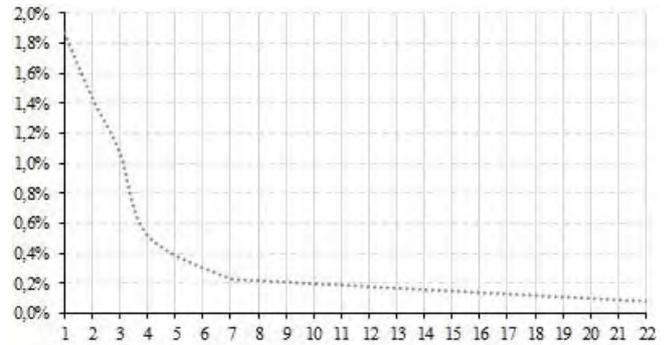
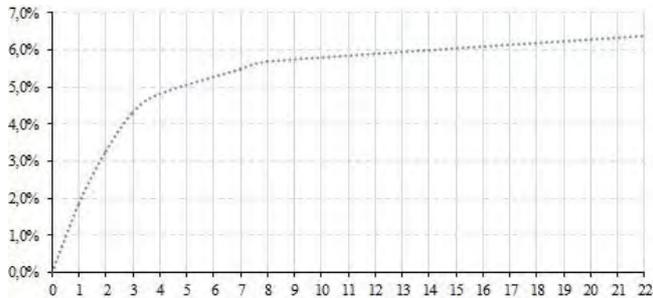
Probeta 7.1



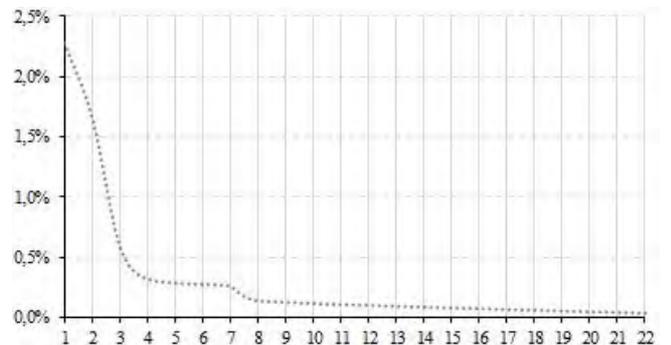
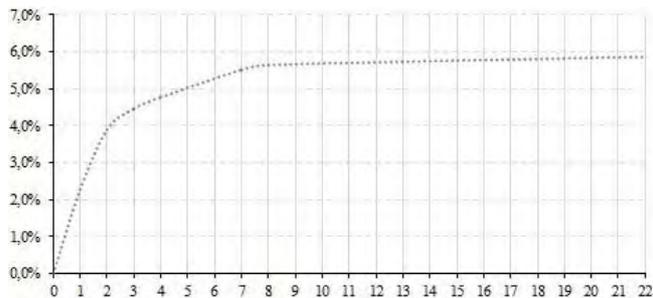
Probeta 7.2



Probeta 7.3



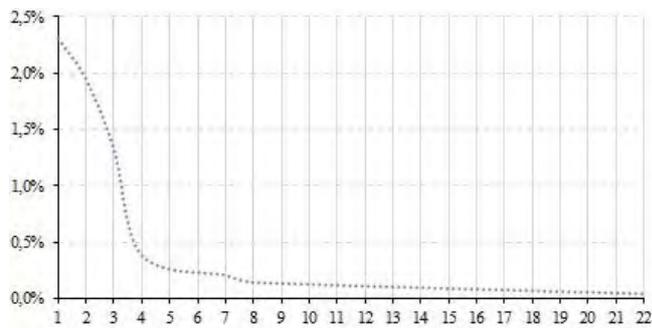
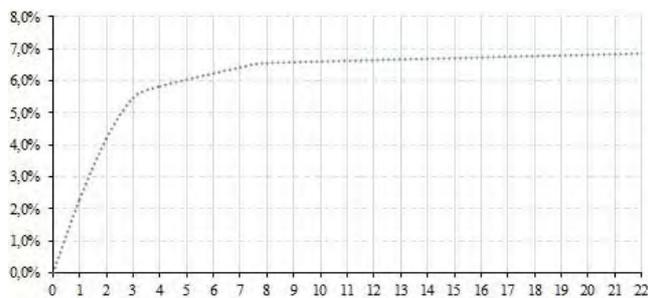
Probeta 7.4



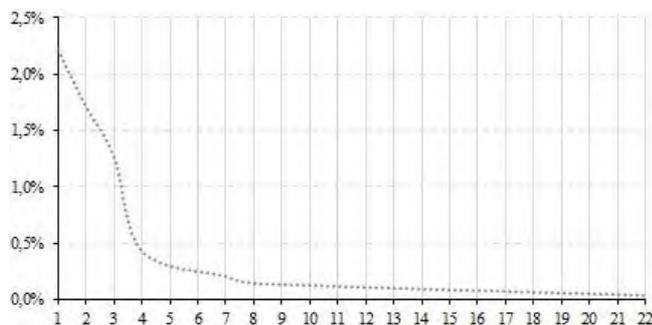
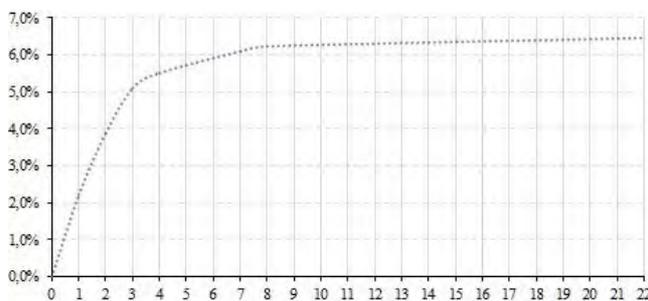
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

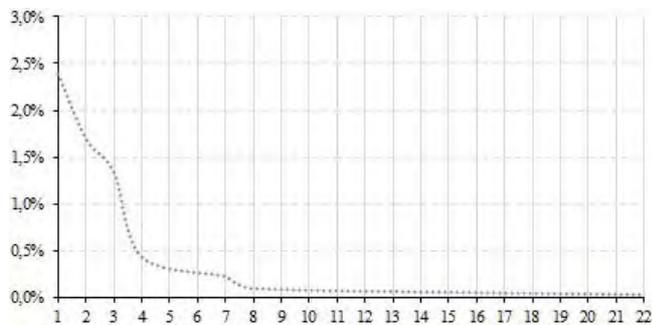
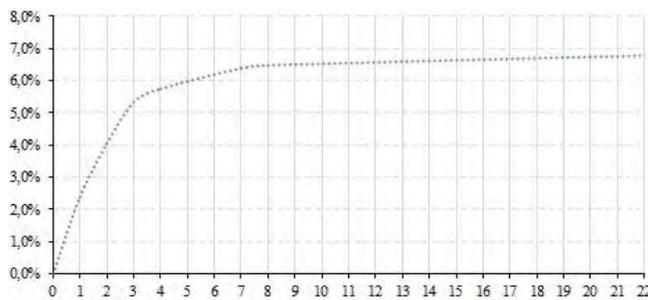
Probeta 8.1



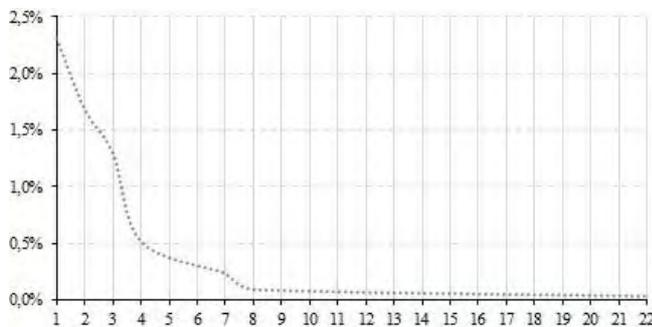
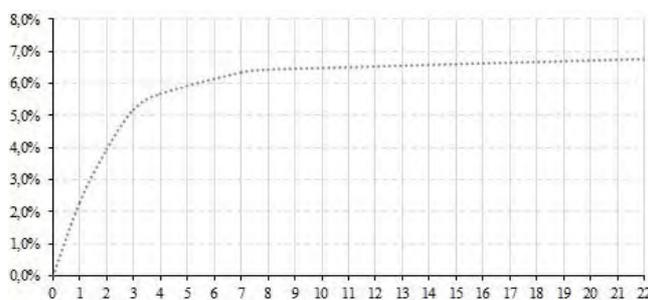
Probeta 8.2



Probeta 8.3



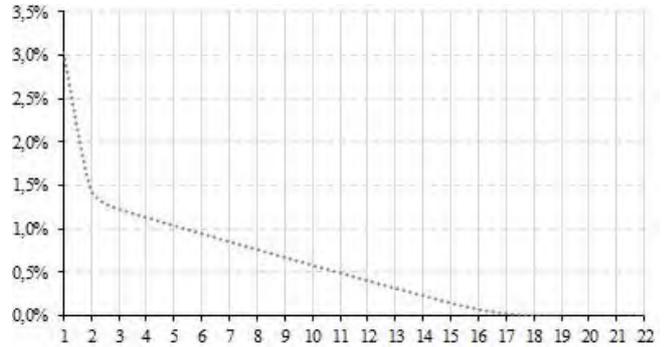
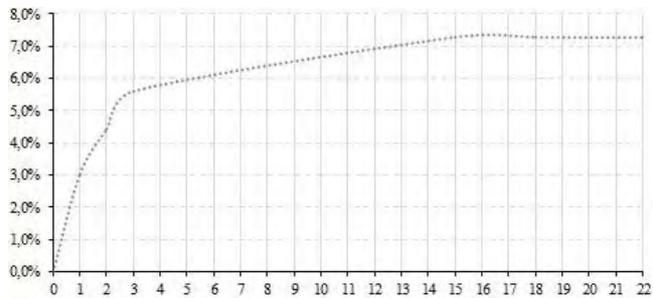
Probeta 8.4



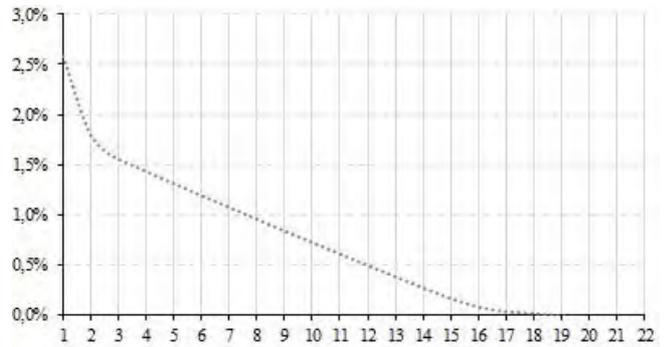
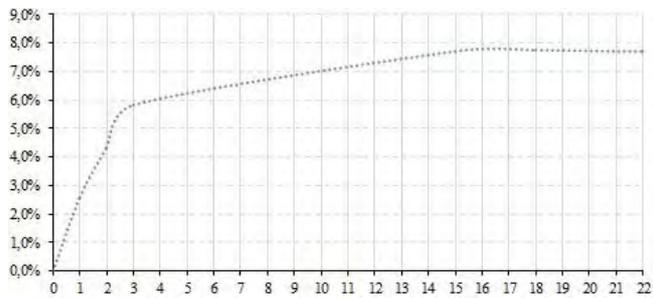
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

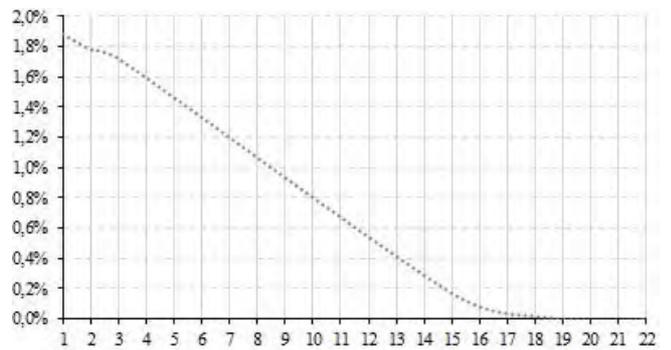
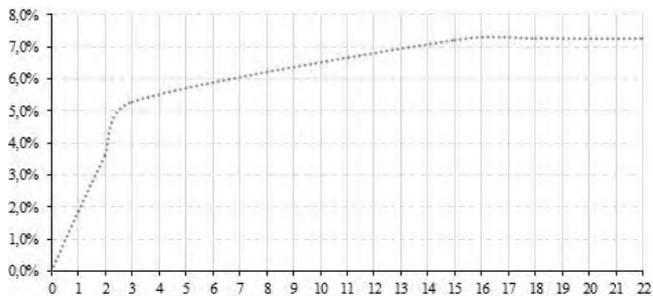
Probeta 9.1



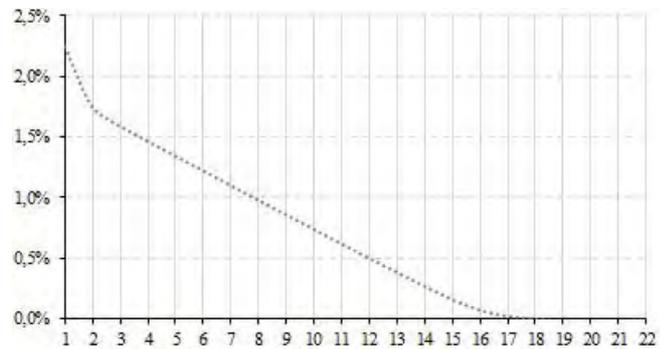
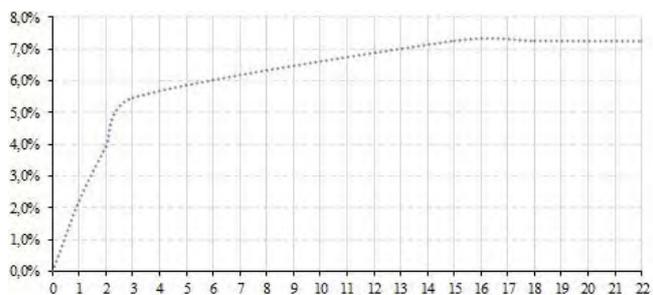
Probeta 9.2



Probeta 9.3



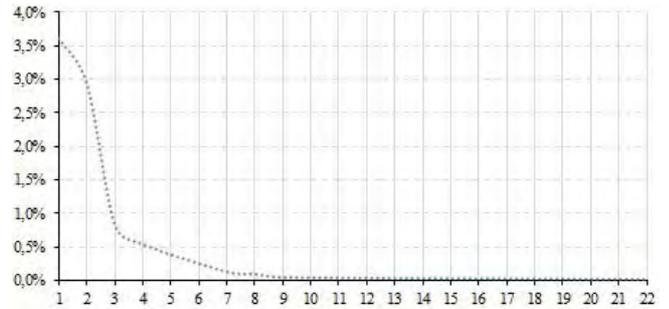
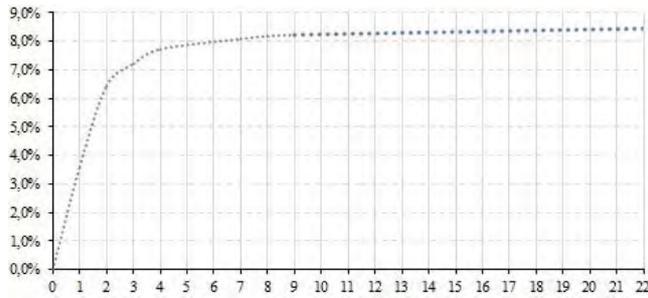
Probeta 9.4



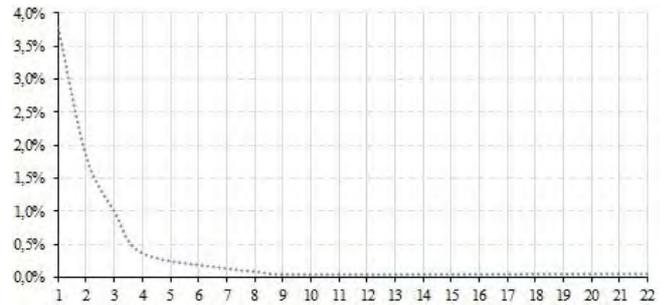
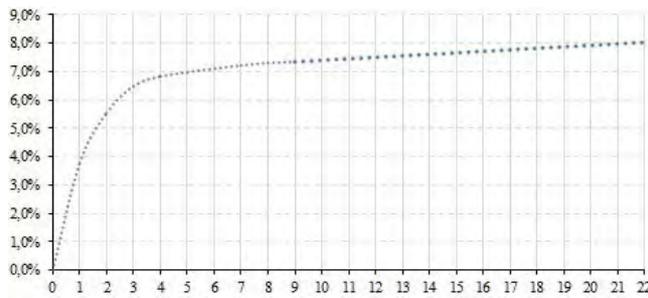
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

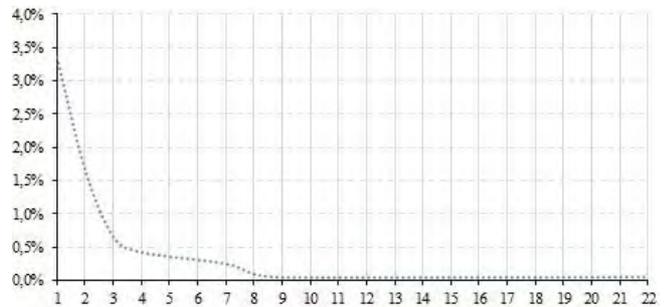
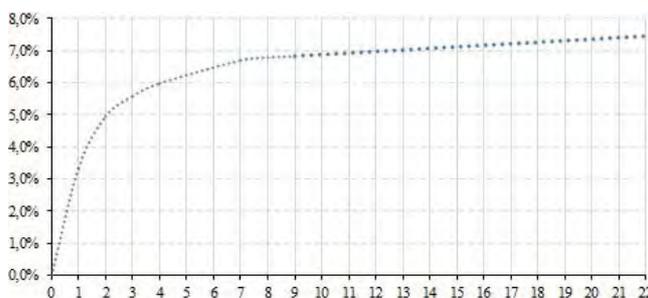
Probeta 10.1



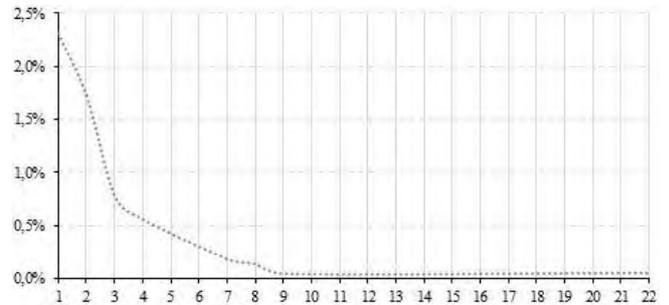
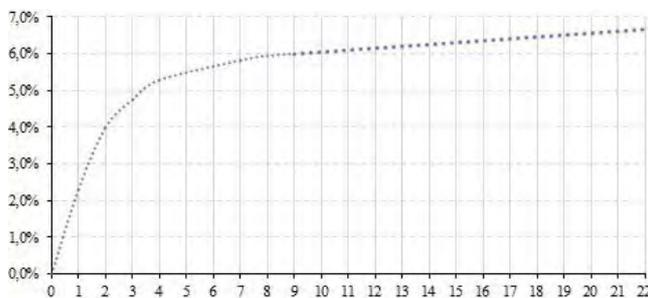
Probeta 10.2



Probeta 10.3



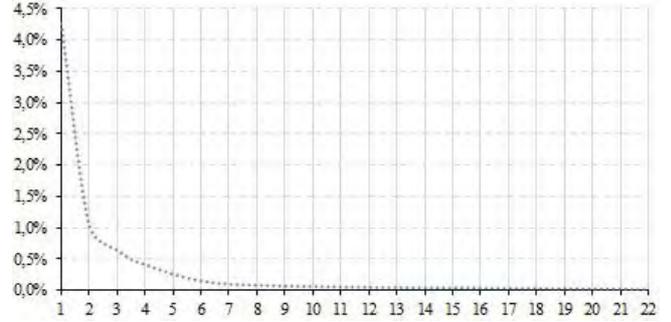
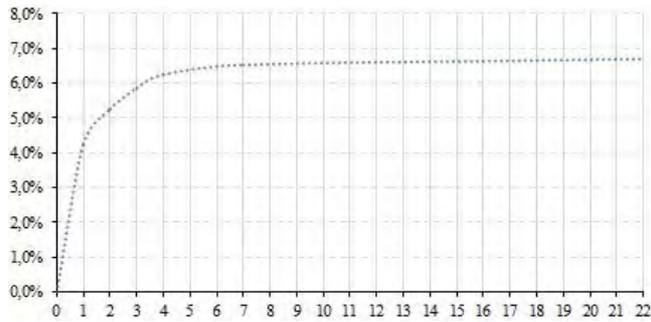
Probeta 10.4



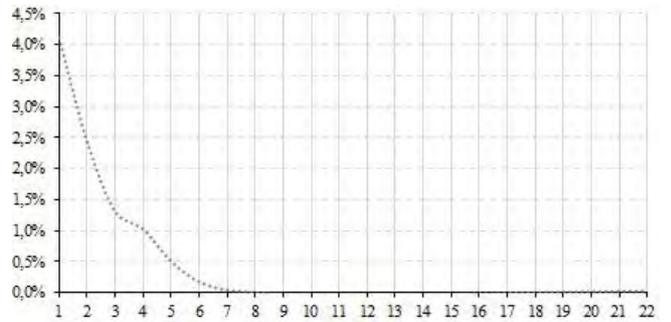
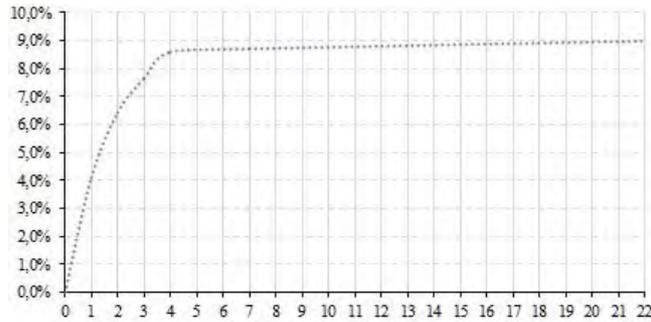
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

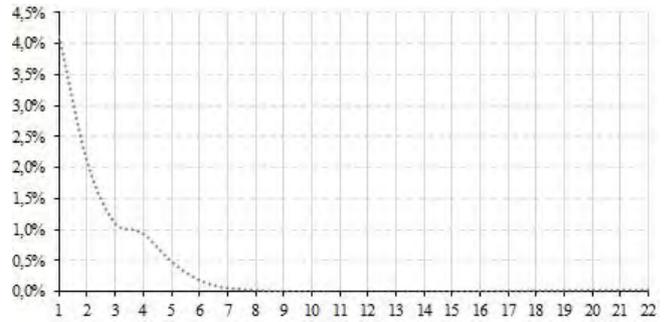
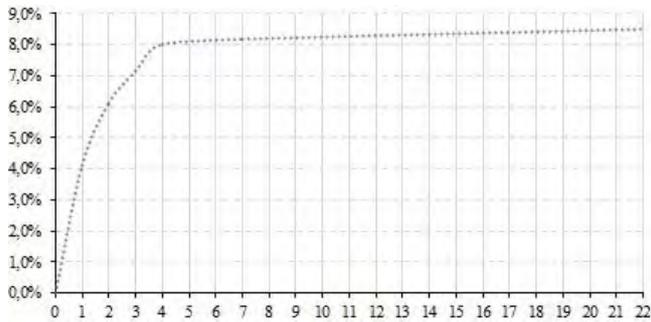
Probeta 11.1



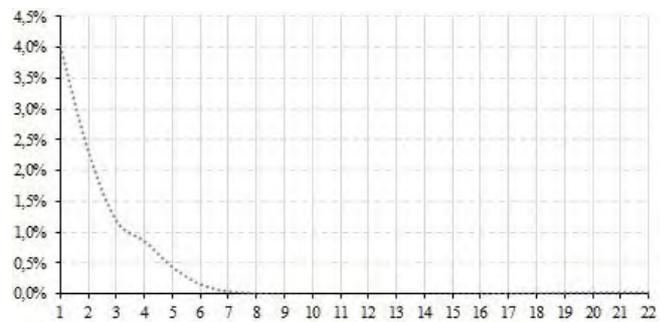
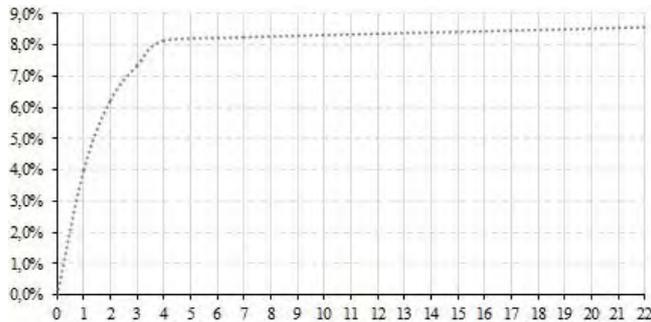
Probeta 11.2



Probeta 11.3



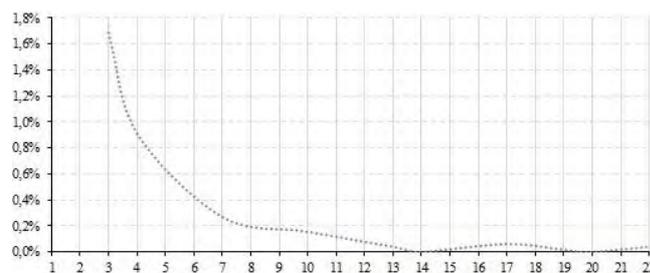
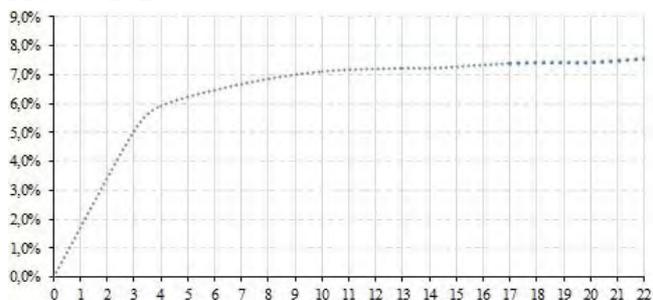
Probeta 11.4



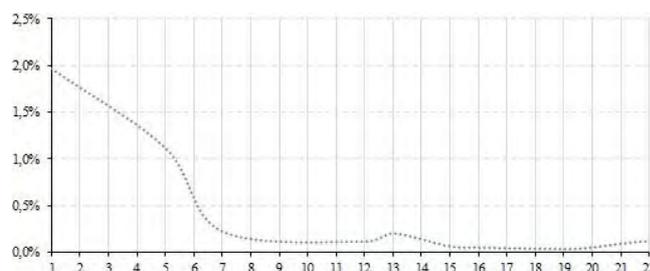
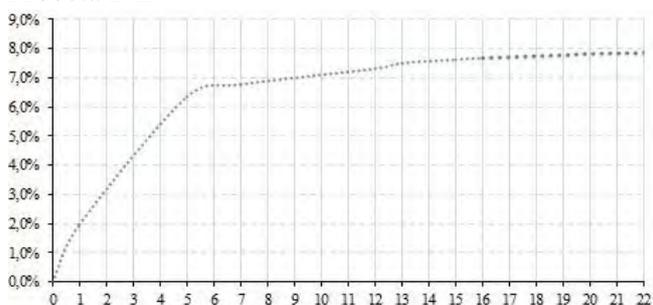
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

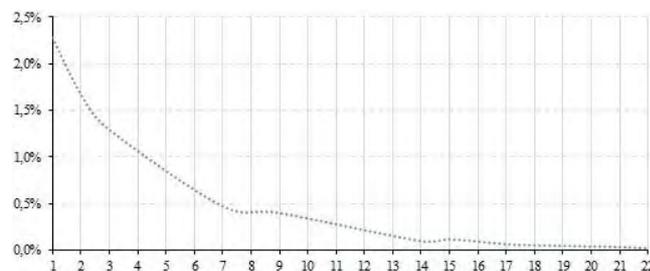
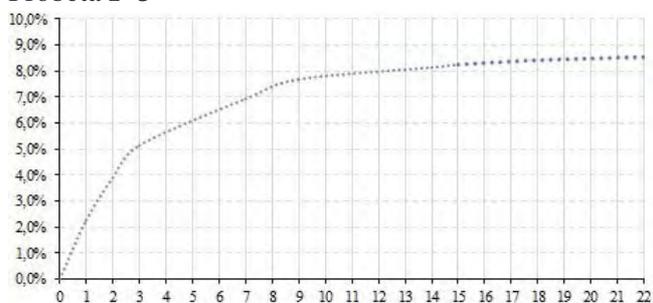
Probeta P-1



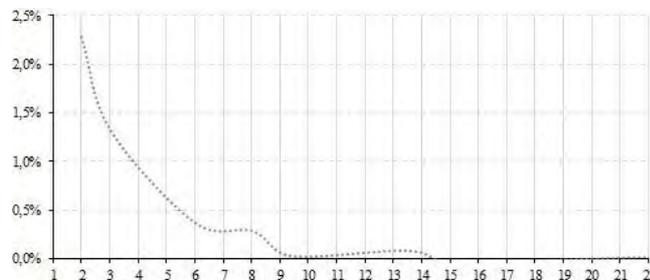
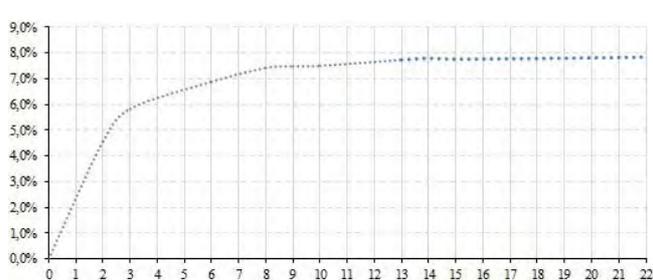
Probeta P-2



Probeta P-3



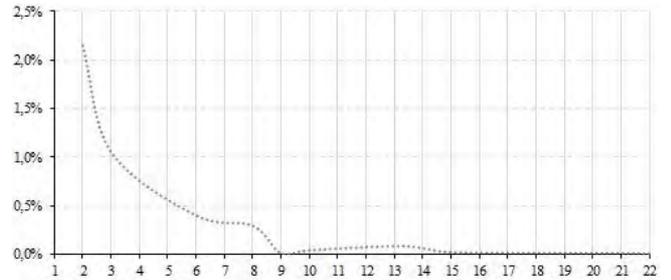
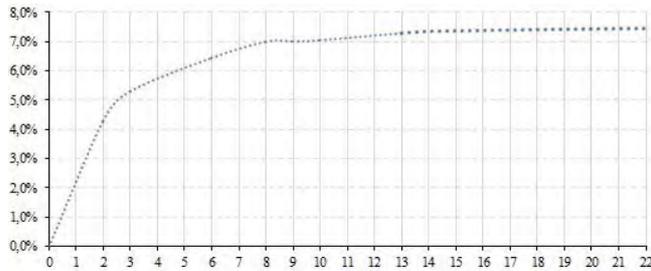
Probeta P-4



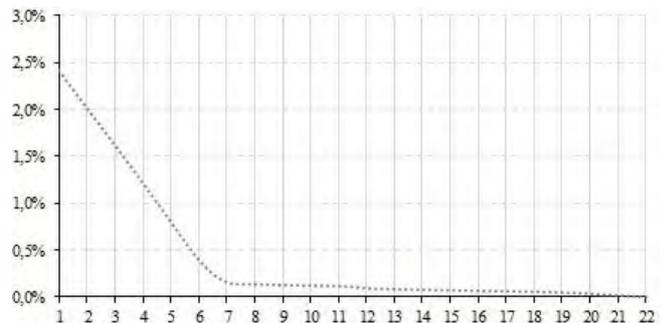
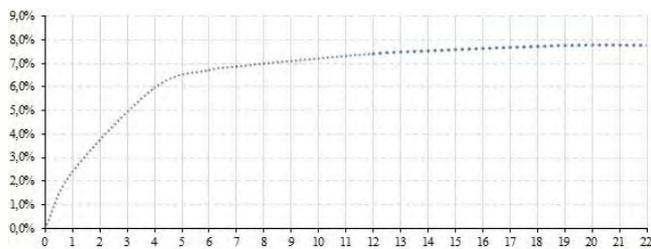
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

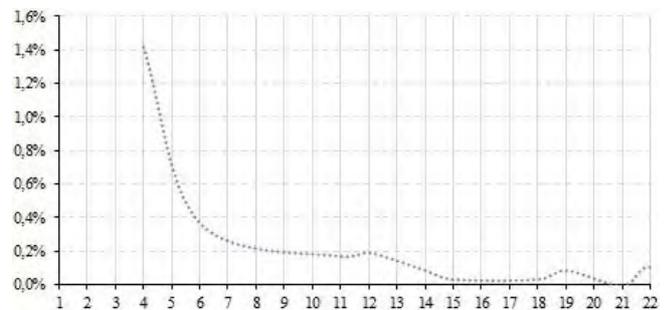
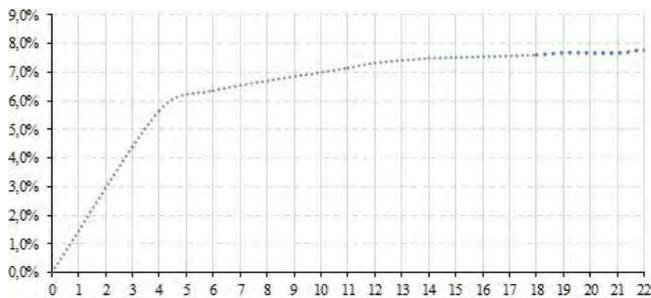
Probeta P-5



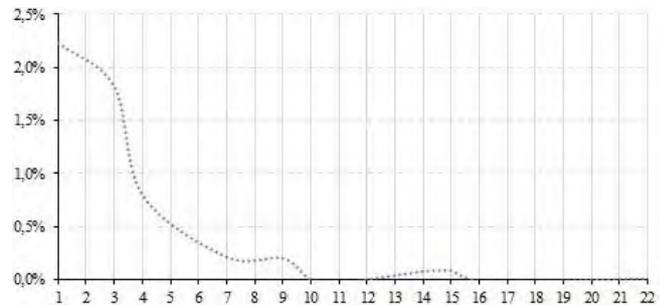
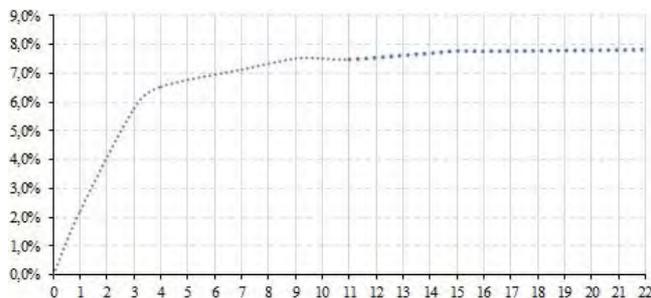
Probeta P-6



Probeta P-7



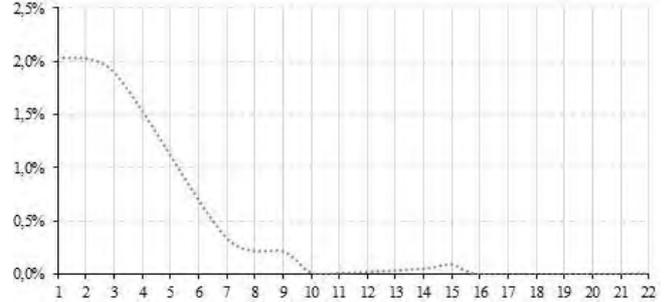
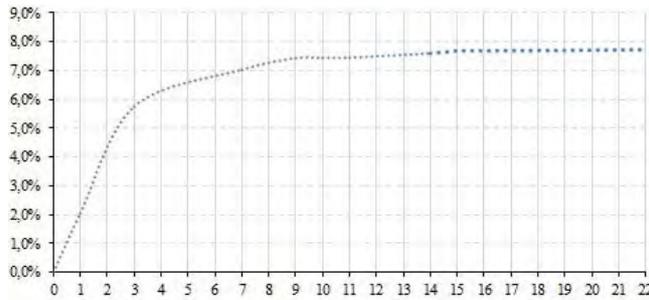
Probeta P-8



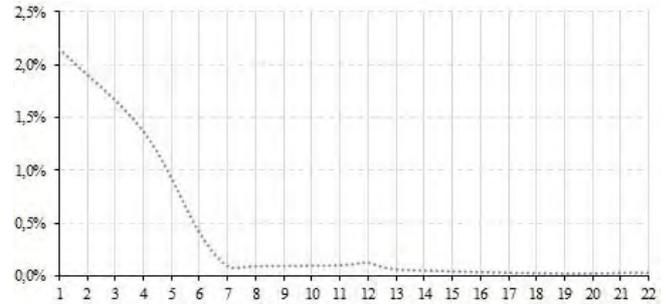
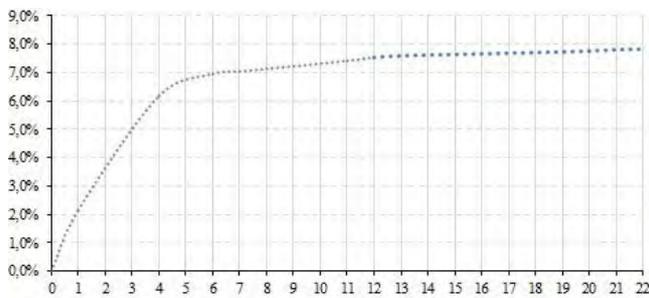
% Pérdida de humedad acumulada

% Pérdida de humedad por días

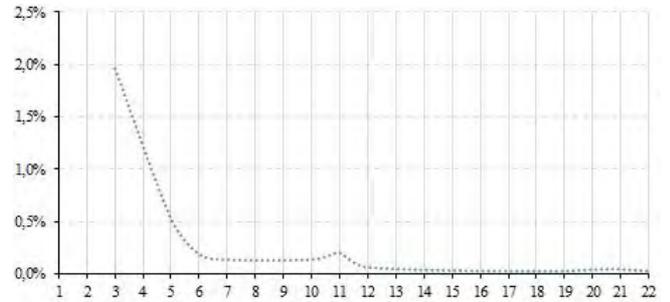
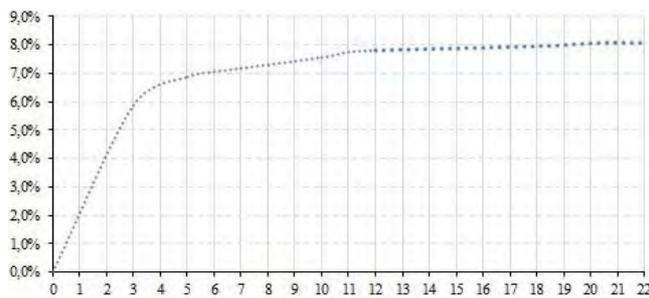
Probeta P-9



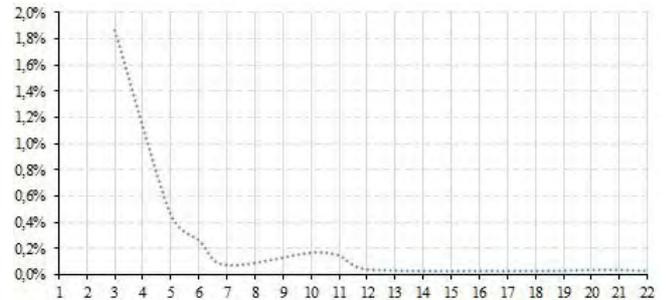
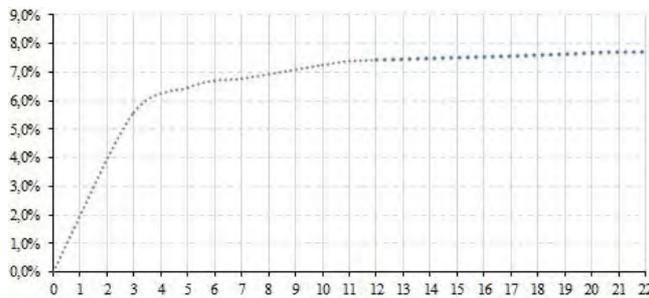
Probeta P-10



Probeta P-11



Probeta P-12



Apéndice I

Datos de cantidad de agua, densidad y UPV de todas las probetas cúbicas

Probeta	Fecha fabricación	Proporción	% Agua (probeta)	Dimensiones (mm)			Volumen (cm ³)	Peso inicial (g)	Densidad inicial (g/cm ³)	Densidad media inicial	Peso final (g)	Pérdida peso (g)	% pérdida peso s/inicial	Media pérdida peso	% agua final probeta	Media agua final en probeta
				a	b	h										
1.1	18/02/2019	3:1	9	100,45	103,61	101,38	1055,05	2278	2,16		2088	190	8,34%		0,72%	
1.2				100,55	102,32	103,01	1059,74	2293	2,16		2117	176	7,68%		1,43%	
1.3				100,35	101,89	101,09	1033,67	2439	2,36		2237	202	8,28%		0,78%	
1.4				100,45	101,42	104,41	1063,60	2365	2,22	2,23	2168	197	8,33%	8,16%	0,73%	0,92%
2.1	13/03/2019	3:1	10	100,26	100,75	102,48	1035,15	2253	2,18		2084	169	7,50%		2,70%	
2.2				100,18	101,52	100,36	1020,63	2218	2,17		2034	184	8,30%		1,86%	
2.3				100,22	101,05	103,75	1050,74	2268	2,16		2101	167	7,36%		2,85%	
2.4				100,27	100,78	100,84	1019,01	2168	2,13	2,16	2003	165	7,61%	7,69%	2,59%	2,50%
3.1	14/03/2019	3:1	8	100,40	101,82	104,57	1068,89	2128	1,99		2026	102	4,79%		3,37%	
3.2				100,46	101,24	101,74	1034,75	2060	1,99		1950	110	5,34%		2,81%	
3.3				100,34	101,03	102,82	1042,27	2083	2,00		1967	116	5,57%		2,57%	
3.4				100,41	101,80	102,91	1051,89	2060	1,96	1,98	1967	93	4,51%	5,05%	3,65%	3,10%
4.1	18/03/2019	4:1	8	101,83	99,71	104,39	1059,88	2122	2,00		2005	117	5,51%		2,63%	
4.2				101,92	99,92	106,02	1079,53	2210	2,05		2091	119	5,38%		2,76%	
4.3				100,06	102,04	106,89	1091,43	2226	2,04		2095	131	5,88%		2,25%	
4.4				100,07	102,07	103,70	1059,21	2135	2,02	2,03	2043	92	4,31%	5,27%	3,86%	2,87%
5.1	25/03/2019	4:1	9	100,18	102,37	100,87	1034,45	2159	2,09		1980	179	8,29%		0,77%	
5.2				99,86	102,27	104,24	1064,53	2212	2,08		2095	117	5,29%		3,92%	
5.3				99,79	101,67	103,01	1045,09	2230	2,13		2099	131	5,87%		3,32%	
5.4				99,98	101,68	103,49	1052,00	2265	2,15	2,11	2114	151	6,67%	6,53%	2,50%	2,63%
6.1	23/03/2019	4:1	10	99,70	101,69	101,09	1024,84	2222	2,17		2072	150	6,75%		3,48%	
6.2				100,13	101,34	100,42	1018,99	2180	2,14		2041	139	6,38%		3,87%	
6.3				100,64	101,14	99,62	1013,92	2195	2,16		2039	156	7,11%		3,11%	
6.4				99,98	100,92	96,29	971,45	2279	2,35	2,20	2110	169	7,42%	6,91%	2,79%	3,32%
7.1	01/04/2019	4:1	9	100,00	102,32	105,18	1076,28	2316	2,15		2190	126	5,44%		3,76%	
7.2				100,29	102,24	100,95	1035,18	2117	2,05		2026	91	4,30%		4,91%	
7.3				100,27	101,80	108,59	1108,37	2407	2,17		2250	157	6,52%		2,65%	
7.4				100,39	101,75	104,01	1062,39	2284	2,15	2,13	2149	135	5,91%	5,54%	3,28%	3,63%
8.1	01/04/2019	4:1	8	100,63	102,25	102,95	1059,31	2212	2,09		2059	153	6,92%		1,16%	
8.2				100,50	101,79	105,40	1078,21	2214	2,05		2070	144	6,50%		1,60%	
8.3				100,29	101,44	103,16	1049,48	2176	2,07		2027	149	6,85%		1,24%	
8.4				100,52	101,54	106,15	1083,41	2254	2,08	2,07	2100	154	6,83%	6,78%	1,25%	1,31%
9.1	22/04/2019	4:1	10	100,01	102,20	101,60	1038,41	2212	2,13		2048	164	7,41%		2,79%	
9.2				100,05	101,55	102,78	1044,24	2284	2,19		2104	180	7,88%		2,30%	
9.3				99,93	101,57	93,88	952,93	2232	2,34		2068	164	7,35%		2,86%	
9.4				100,05	101,46	101,62	1031,50	2232	2,16	2,21	2067	165	7,39%	7,51%	2,82%	2,69%
10.1	06/03/2019	3:1	9	99,86	102,19	106,10	1082,71	2189	2,02		2004	185	8,45%		0,60%	
10.2				99,89	102,67	110,27	1130,87	2328	2,06		2141	187	8,03%		1,05%	
10.3				100,27	102,94	104,63	1079,92	2240	2,07		2073	167	7,46%		1,67%	
10.4				100,51	102,81	105,03	1085,36	2252	2,07	2,06	2102	150	6,66%	7,65%	2,51%	1,46%
11.1	18/02/2018	3:1	9	100,19	101,14	101,99	1033,49	1808	1,75		1687	121	6,69%		2,47%	
11.2				100,32	100,88	99,11	1002,96	1803	1,80		1641	162	8,99%		0,02%	
11.3				100,34	101,03	102,82	1042,27	1847	1,77		1690	157	8,50%		0,55%	
11.4				100,26	100,94	103,70	1049,45	1891	1,80	1,78	1729	162	8,57%	8,19%	0,47%	0,88%

Datos de dimensión y densidad de probetas cúbicas

Probeta	Proporción	% Agua (probeta)	Densidad inicial (g/cm ³)	Ultrasonidos											
				Densidad media inicial	% agua final probeta	Media agua final en probeta	Densidad final (g/cm ³)	Densidad final media	Variación de densidad	Tiempo s/a (ms)	Velocidad (m/s)	Velocidad media serie	Velocidad / densidad	Media velocidad / densidad	
1.1	3:1	9	2,16		0,72%		1,98				54,00	1860,14	1997,53	0,94	0,98
1.2			2,16		1,43%		2,00				51,80	1941,07		0,97	
1.3			2,36		0,78%		2,16				51,20	1959,96		0,91	
1.4			2,22	2,23	0,73%	0,92%	2,04	2,04	8,16%	45,50	2228,96	1,09			
2.1	3:1	10	2,18		2,70%		2,01				49,00	2046,12	1990,77	1,02	1,00
2.2			2,17		1,86%		1,99				54,00	1879,95		0,94	
2.3			2,16		2,85%		2,00				50,50	2001,04		1,00	
2.4			2,13	2,16	2,59%	2,50%	1,97	1,99	7,69%	49,50	2035,96	1,04			
3.1	3:1	8	1,99		3,37%		1,90				54,00	1859,17	1773,71	0,98	0,94
3.2			1,99		2,81%		1,88				53,90	1878,20		1,00	
3.3			2,00		2,57%		1,89				59,70	1692,25		0,90	
3.4			1,96	1,98	3,65%	3,10%	1,87	1,88	5,06%	60,30	1665,22	0,89			
4.1	4:1	8	2,00		2,63%		1,89				65,10	1564,13	1654,30	0,83	0,86
4.2			2,05		2,76%		1,94				65,70	1551,22		0,80	
4.3			2,04		2,25%		1,92				57,10	1752,41		0,91	
4.4			2,02	2,03	3,86%	2,87%	1,93	1,92	5,27%	57,20	1749,43	0,91			
5.1	4:1	9	2,09		0,77%		1,91				54,70	1871,53	1941,31	0,98	0,98
5.2			2,08		3,92%		1,97				52,60	1944,30		0,99	
5.3			2,13		3,32%		2,01				48,70	2087,68		1,04	
5.4			2,15	2,11	2,50%	2,63%	2,01	1,98	6,53%	53,70	1861,73	0,93			
6.1	4:1	10	2,17		3,48%		2,02				50,70	1966,47	2014,86	0,97	0,98
6.2			2,14		3,87%		2,00				49,20	2035,11		1,02	
6.3			2,16		3,11%		2,01				48,80	2062,30		1,03	
6.4			2,35	2,20	2,79%	3,32%	2,17	2,05	6,92%	50,10	1995,56	0,92			
7.1	4:1	9	2,15		3,76%		2,03				45,00	2222,28	2083,92	1,09	1,03
7.2			2,05		4,91%		1,96				56,40	1778,24		0,91	
7.3			2,17		2,65%		2,03				44,60	2248,15		1,11	
7.4			2,15	2,13	3,28%	3,65%	2,02	2,01	5,56%	48,10	2087,01	1,03			
8.1	4:1	8	2,09		1,16%		1,94				55,80	1803,36	1763,15	0,93	0,91
8.2			2,05		1,60%		1,92				56,50	1778,81		0,93	
8.3			2,07		1,24%		1,93				60,20	1665,86		0,86	
8.4			2,08	2,07	1,25%	1,31%	1,94	1,93	6,78%	55,70	1804,58	0,93			
9.1	4:1	10	2,13		2,79%		1,97				56,40	1773,14	1794,55	0,90	0,88
9.2			2,19		2,30%		2,01				56,20	1780,25		0,88	
9.3			2,34		2,86%		2,17				56,50	1768,67		0,81	
9.4			2,16	2,21	2,82%	2,69%	2,00	2,04	7,51%	53,90	1856,12	0,93			
10.1	3:1	9	2,02		0,60%		1,85				67,40	1481,64	1620,68	0,80	0,85
10.2			2,06		1,05%		1,89				64,90	1539,14		0,81	
10.3			2,07		1,67%		1,92				57,50	1743,83		0,91	
10.4			2,07	2,06	2,51%	1,46%	1,94	1,90	7,64%	58,50	1718,12	0,89			
11.1	3:1	9	1,75		2,47%		1,63				111,00	902,59	1052,12	0,55	0,64
11.2			1,80		0,02%		1,64				90,00	1114,61		0,68	
11.3			1,77		0,55%		1,62				94,80	1058,39		0,65	
11.4			1,80	1,78	0,47%	0,88%	1,65	1,63	8,20%	88,50	1132,88	0,69			

Datos de densidad y UPV de probetas cúbicas

Bibliografía

- Alejandro, F. y Martín del Río, J. (2012). Caracterización analítica de la muralla de tapial almohade de San Juan de Aznalfarache (Sevilla, España).
- Alessandrini, G., Bugini, R., Folli, L., Realini, M., y Toniolo, L. (1992). The compositional ratios of mortars. comparison between chemical and petrographical methods. En *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: held in Lisbon, Portugal, 15-18 June 1992*, pp. 667–676.
- Alex, D., Gandreau, D., Guillaud, H., Joffroy, T., Moriset, S., Anger, R., Fontaine, L., Rakotomamonjy, B., y Misse, A. (2012). *Petit guide des architectures en pisé à Lyon*. CRAterre-ENSAG.
- Álvarez Cabrera, J. (1994). Influencia del tipo de curado sobre un conglomerante cal-toba-yeso. *Materiales de Construcción*, 44(235):45–47.
- Arízaga, B. y Solorzano, J. A. (2010). *Construir la ciudad en la Edad Media*. Instituto de Estudios Riojanos.
- Arizzi, A. (2012). *Design of ready-to-use rendering mortars for use in restoration work*. Granada: Universidad de Granada.
- Arrigoni, A., Beckett, C., Ciancio, D., y Dotelli, G. (2017). Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilised rammed earth. *Construction and Building Materials*, 142:128–136.
- ASTM-C:215-19 (2019). Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. *American Society for Testing and Material*, p. 7.
- ASTM-C:597-02 (2003). Pulse velocity through concrete. *West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Material*, 4(02):3–6.
- Aymat, C. (2000). Patología y rehabilitación de cajones de tapial. *Cercha*, 52:75–79.
- Azañón, J. M., Azor, A., Booth-Rea, G., y Torcal, F. (2004). Small-scale faulting, topographic steps and seismic ruptures in the Alhambra (Granada, Southeast Spain). *Journal of Quaternary Science*, 19(3):219–227.
- Balbuena, G. F. (1922). La arquitectura humilde de un pueblo del páramo leonés. *Arquitectura: órgano de la Sociedad Central de Arquitectos*, 38:225–246.

- Balil, A. (1973). *Casa y urbanismo en la España antigua*. Valladolid: Universidad de Valladolid, Facultad de Filosofía y Letras, Servicio de Publicaciones.
- Barba, L. y Villaseñor, M. I. (2013). *La cal, historia, propiedades y usos*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Barenblatt, G. (1962). The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in applied mechanics*, 7(1):55–129.
- Barrios, M. (1976). *Estudio crítico sobre la resistencia a compresión de probetas de hormigón de cemento puzolánico a diferentes edades*. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, Madrid.
- Barros, J. A., Baghi, H., Dias, S. J., y Ventura-Gouveia, A. (2013). A FEM-based model to predict the behaviour of RC beams shear strengthened according to the NSM technique. *Engineering structures*, 56:1192–1206.
- Bauluz del Río, G. y Bárcena, P. (1992). *Bases para el diseño y construcción con tapial*. Monografías de la Dirección General para la Vivienda y Arquitectura. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid.
- Bazant, Z. P. y Planas, J. (1997). *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*, volumen 16. CRC press.
- Benito, B., Gaspar-Escribano, J., García-Mayordomo, J., Jiménez, M., y García Rodríguez, M. (2006). Proyecto RISMUR. evaluación de la peligrosidad sísmica. *Instituto Geográfico Nacional y Protección Civil de Murcia, Madrid*.
- Benito, B., Jiménez, E., García-Rodríguez, M., Gaspar-Escribano, J., Pastor, J., Navarro, M., y Murphy, P. (2007). Evaluación de la peligrosidad y el riesgo sísmico en Andalucía. *Final Report of the SISMOSAN Project*, 4:164.
- Benito, M., Navarro, M., Vidal, F., Gaspar-Escribano, J., García-Rodríguez, M., y Martínez-Solares, J. (2010). A new seismic hazard assessment in the region of Andalusia (Southern Spain). *Bulletin of earthquake engineering*, 8(4):739–766.
- Bestraten Castells, S. C., Hormias Laperal, E., y Altemir Montaner, A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la Construcción*, 63(523):5–20.
- Bonen, D. (1994). Calcium hydroxide deposition in the near interfacial zone in plain concrete. *Journal of the American Ceramic Society*, 77(1):193–196.
- Bramshuber, W. y Hilsdorf, H. (1990). Influence of ligament length and stress state on fracture energy of concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 35(1-3):95–106.
- Brühwiler, E. y Wittmann, F. (1990). The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests. *Engineering fracture mechanics*, 35(1-3):117–125.
- Bui, Q.-B., Hans, S., Morel, J.-C., y Do, A.-P. (2011). First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings. *Engineering Structures*, 33(12):3690–3695.

- Bui, Q.-B. y Morel, J.-C. (2009). Assessing the anisotropy of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 23(9):3005–3011.
- Bui, Q.-B., Morel, J.-C., Hans, S., y Walker, P. (2014). Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 54:163–169.
- Calavera, J., Gómez, J., González, G., y Ley, J. (2005). *Estudio experimental sobre la influencia de distintos procedimientos de curado inicial en obra, en la resistencia a compresión de probetas de hormigón*. Instituto Técnico de Materiales y Construcciones, Madrid.
- Canivell, J., Martín-del Río, J. J., Alejandre, F., García-Heras, J., y Jiménez-Aguilar, A. (2018). Considerations on the physical and mechanical properties of lime-stabilized rammed earth walls and their evaluation by ultrasonic pulse velocity testing. *Construction and Building Materials*, 191:826–836.
- Castillo, A., Espriella, A., y Martínez Bustos, R. (2013). Automatización sistema de trituración y molienda proceso de cal viva.
- Cazalla, O., Rodríguez-Navarro, C., Sebastian, E., Cultrone, G., y De la Torre, M. J. (2000a). Aging of lime putty: effects on traditional lime mortar carbonation. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(5):1070–1076.
- Cazalla, O., Sebastián, E., y Rodríguez, C. (2002). Morteros de cal: aplicación en el patrimonio histórico.
- Cazalla, O., Sebastián Pardo, E. M., Torre López, M. J. d. l., Paolis, M. A., Rodríguez Navarro, C., y Cultrone, G. (2000b). Estudio mineralógico-petrográfico de los materiales de construcción de la Rauda en la Alhambra. *Cuadernos de la Alhambra*.
- CEDEX (1994). Caracterización geotécnica de las condiciones de cimentación del conjunto monumental de la Alhambra y Generalife. *Informe parcial 5, tomo II de III, anejos 1, 2 y 3*.
- Chang, T.-P., Lin, H.-C., Chang, W.-T., y Hsiao, J.-F. (2006). Engineering properties of light-weight aggregate concrete assessed by stress wave propagation methods. *Cement and Concrete Composites*, 28(1):57–68.
- Ciancio, D. y Augarde, C. (2013). Capacity of unreinforced rammed earth walls subject to lateral wind force: elastic analysis versus ultimate strength analysis. *Materials and structures*, 46(9):1569–1585.
- Cid, J., Mazarrón, F., y Cañas, I. (2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de la Construcción*, 63(523):159–169.
- Cifuentes, H. y Medina, F. (2013). Mecánica de la fractura aplicada al hormigón. *Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla*.
- Cifuentes, H., Ríos, J. D., y Gómez Álvarez, E. J. (2018). Effect of mix design on the size-independent fracture energy of normal-and high-strength self-compacting concrete. *Materiales de Construcción*, 68 (329), 1-11.

- Civantos, J. M. M. (2002). Ensayo de análisis comparativo de técnicas, materiales y tipos constructivos en las fortificaciones medievales del Zenete (Granada). *Miscelánea Medieval Murciana*, 25-26:183–229.
- Cointeraux, F. (1791). *Traite des constructions rurales et e leur disposition*. Paris, France.
- Comartin, C., Niewiarowski, R., y Rojahn, C. (1996). ATC-40 seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. *SSC 96*, 1.
- Corbin, A. y Augarde, C. (2014). Fracture energy of stabilised rammed earth. *Procedia materials science*, 3:1675–1680.
- Corominas, J. y Pascual, J. (1954). *Diccionario crítico etimológico de la lengua castellana*. Vols I-IV. Madrid. Gredos.
- De la Torre, M. J. (1994). *Estudio de los materiales de construcción en la Alhambra*. Tesis doctoral, Universidad de Granada.
- Dierks, K. y Stein, R. (2002). Ein bemessungskonzept für tragende stampflehmwände. *Moderner Lehm*, pp. 37–48.
- Dugdale, D. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2):100–104.
- Elvery, R. e Ibrahim, L. (1976). Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages. *Magazine of Concrete Research*, 28(97):181–190.
- Espinosa, P. C. (1859). *Manual de construcciones de albañilería*.
- Fernández Carrasco, L. (1999). Nuevos avances en la carbonatación del cemento aluminoso. *Hidrólisis alcalina. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). Materiales de construcción*, 49(253).
- Fernández Paris, J. (1973). *La carbonatación de la pasta hidratada de cemento portland, Interpretación físico-química*. Patronato de Investigación y Técnica Juan de la Cierva - Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Gaidis, J. y Rosenberg, A. (1986). New test for determining fundamental frequencies of concrete. *Cement, concrete and aggregates*, 8(2):117–119.
- Galán-Marín, C., Rivera-Gómez, C., y Bradley, F. (2013). Ultrasonic, molecular and mechanical testing diagnostics in natural fibre reinforced, polymer-stabilized earth blocks. *International Journal of Polymer Science*, 2013.
- Galbis, J. (1932). *Catálogo sísmico de la zona comprendida entre los meridianos 50 e y 200 w de Greenwich y los paralelos 450 y 250 n*. Imprenta de Ramona Velasco, viuda de P. Pérez.
- Galván-Ruiz, M., Hernández, J., Baños, L., Noriega-Montes, J., y Rodríguez-García, M. E. (2009). Characterization of calcium carbonate, calcium oxide, and calcium hydroxide as starting point to the improvement of lime for their use in construction. *Journal of Materials in civil Engineering*, 21(11):694–698.

- Gamrani, N., Chaham, K. R., Ibnoussina, M., Fratini, F., Rovero, L., Tonietti, U., Mansori, M., Daoudi, L., Favotto, C., y Youbi, N. (2012). The particular rammed earth of the Saadian sugar refinery of Chichaoua (XVIth century, Morocco): mineralogical, chemical and mechanical characteristics. *Environmental Earth Sciences*, 66(1):129–140.
- García Bellido, A. (1947). La España del siglo primero de nuestra era. *EspasaCalpe, Buenos Aires*.
- Gaspar-Tebar, D. y Plaza, M. M. (1977). Acción del CO₂ sobre un cemento portland. Influencia sobre las características químicas y fisicomecánicas. *Materiales de construcción*, (165):37–54.
- Gasparini, G. y Margolies, L. (1986). *Arquitectura popular de Venezuela*. Fundación Eugenio Mendoza.
- Ghafoory-Ashtiany, M. y Hosseini, M. (2008). Post-Bam earthquake: recovery and reconstruction. *Natural Hazards*, 44(2):229–241.
- Glucklich, J. (1968). The effect of microcracking on time-dependent deformations and the long-term strength of concrete.
- Gomes, M. I., Gonçalves, T. D., y Faria, P. (2014). Unstabilized rammed earth: characterization of material collected from old constructions in South Portugal and comparison to normative requirements. *International Journal of Architectural Heritage*, 8(2):185–212.
- Gómez-Moreno Martínez, M. (1966). Granada en el siglo XIII.
- González, T., Álvarez de Buergo, M., y Casas, A. d. I. (1997). Estudio de los materiales y de las fabricas de la Torre de Comares de la Alhambra. *Cuadernos de la Alhambra*, 33:95–104.
- González Cortina, M. (2000). *Recuperación de morteros romanos de cal y chamota en aplicaciones actuales*. Tesis doctoral, Arquitectura.
- Graciani, A. y Tabales, M. Á. (2008). El tapial en el área sevillana. Avance cronotipológico estructural. *Arqueología de la Arquitectura*, (5):135–158.
- Groves, G. (1994). TEM studies of carbonation and ASR. En *Cement Manufacture and Use*, pp. 211–216. ASCE.
- Guinea, G., Planas, J., y Elices, M. (1992). Measurement of the fracture energy using three-point bend tests. Part 1 influence of experimental procedures. *Materials and Structures*, 25(4):212–218.
- Guinea, G. V. (1990). *Medida de la energía de fractura del hormigón*. Tesis doctoral, Escuela de Ingenieros de Caminos UPM.
- Guntzel, J. G. (1990). On the history of clay buildings in Germany. En *6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture: Adobe 90 preprints: Las Cruces, New Mexico, USA, October 14-19, 1990*, pp. 57–65. Getty Conservation Institute.
- Hall, M. y Djerbib, Y. (2004). Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. *Construction and Building Materials*, 18(4):281–286.

- Higuchi, Y. y Kesler, C. E. (1954). Problems in the sonic testing of plain concrete. En *Proceedings of the RILEM International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures, Paris*, volumen 28, pp. 45–53.
- Hillerborg, A. (1985). The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete. *Materials and structures*, 18(4):291–296.
- Hillerborg, A., Modéer, M., y Petersson, P.-E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and concrete research*, 6(6):773–781.
- Hilsdorf, H. y Brameshuber, W. (1991). Code-type formulation of fracture mechanics concepts for concrete. *International Journal of Fracture*, 51(1):61–72.
- Hornibrook, F. B. (1939). Application of sonic method to freezing and thawing studies of concrete. *ASTM Bulletin*, 101:5–8.
- Houben, H. y Guillaud, H. (1994). Earth construction: a comprehensive guide. *London: Intermediate Technology publications*.
- Hsu, T. T., Slate, F. O., Sturman, G. M., y Winter, G. (1963). Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve. En *Journal Proceedings*, volumen 60, pp. 209–224.
- Hussaini, S. M. S. y Toufigh, V. (2019). Strength and fracture behavior of rammed-earth materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10).
- ISO:13320 (2020). Particle size analysis. *Laser diffraction methods*, p. 59.
- Jenq, Y. y Shah, S. P. (1985). Two parameter fracture model for concrete. *Journal of engineering mechanics*, 111(10):1227–1241.
- Jones, R. (1962). Nondestructive testing of concrete. *Press, Cambridge University*.
- Kaplan, M. (1961). Crack propagation and the fracture of concrete. *Journal Proceedings*, 58(11):591–610.
- Karihaloo, B. L. (1995). Fracture mechanics and structural concrete. *Longman Scientific and Technical*.
- Kázmér, M., Major, B., Hariyadi, A., Pramumijoyo, S., y Ditto Haryana, Y. (2010). Living with earthquakes-development and usage of earthquake-resistant construction methods in european and asian antiquity. *EGUGA*, p. 14244.
- Korneev, V. y Tsvang, A. (1986). Study of carbonation of lime quartz mixtures. *Journal of Applied Chemistry of the USSR*, 59(1):150–153.
- Kraus, C., Hirmas, D., y Roberts, J. (2014). Compressive strength of blood stabilized earthen architecture. En *Earthen Architecture: Past, Present and Future*, pp. 233–236. CRC Press.
- Krauβ, M. y Hariri, K. (2006). Determination of initial degree of hydration for improvement of early-age properties of concrete using ultrasonic wave propagation. *Cement and Concrete Composites*, 28(4):299–306.

- Labadi, Y. y Hannachi, N. (2005). Numerical simulation of brittle damage in concrete specimens. *Strength of materials*, 37(3):268–281.
- Lombillo, I., Villegas, L., Fodde, E., y Thomas, C. (2014). In situ mechanical investigation of rammed earth: Calibration of minor destructive testing. *Construction and Building Materials*, 51:451–460.
- López, F. J. (1999). Tapias y tapiales. *Loggia, Arquitectura & Restauración*, 8:74–89.
- Lynch, G. (1998). Lime mortars for brickwork: traditional practice and modern misconceptions - part one. *Journal of architectural conservation*, 4(1):7–20.
- Malhotra, V. M. y Carino, N. J. (2003). *Handbook on nondestructive testing of concrete*. CRC press.
- Maniatidis, V. y Walker, P. (2008). Structural capacity of rammed earth in compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3):230–238.
- Martín-del Rio, J. J., Flores-Alés, V., Alejandro-Sánchez, F. J., y Blasco-López, F. J. (2019). New method for historic rammed-earth wall characterization: The almohade ramparts of Malaga and Seville. *Studies in Conservation*, 64(6):363–372.
- Martínez, M. y González, V. (2005). Estudio de reconocimiento de patología de unos muros: Huertas del Generalife, Granada. *Informe interno del Patronato de la Alhambra y el Generalife*.
- Martínez Solares, J., Cabañas, L., Benito, B., Ricas, A., Gaspar, J., Ruíz, S., y Rodríguez, O. (2013). Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012. *Centro Nacional de Información Geográfica, Madrid*.
- Martínez Soto, F. (2013). *Análisis experimental de la curva de dispersión de velocidades de ondas superficiales en morteros a edad temprana*. Universidad de Granada.
- Mehta, P. K. (1986). *Concrete. structure, properties and materials*.
- Meininger, R. C. (1983). Effects of initial field curing on standard 28-day cylinder strengths. *Cement, concrete and aggregates*, 5(2):137–141.
- Mezcua, J. y Solares, J. M. M. (1983). *Sismicidad del área íbero magrebí*. Instituto Geográfico Nacional.
- Miccoli, L., Müller, U., y Fontana, P. (2014). Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and building materials*, 61:327–339.
- Miccoli, L., Oliveira, D. V., Silva, R. A., Müller, U., y Schueremans, L. (2015). Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling. *Materials and Structures*, 48(10):3443–3456.
- Michel, P. y Poudru, F. (1987). Le patrimoine construit en terre en France métropolitaine. En *Colloque international Le patrimoine européen construit en terre et sa réhabilitation. Vaulx-en-Velin, France*, pp. 529–551.

- Mihashi, H. y Leite, J. P. d. B. (2004). State-of-the-art report on control of cracking in early age concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2(2):141–154.
- Mileto, C. y Vegas, F. (2014). La restauración de la tapia en la península ibérica. *Criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. Valencia/Lisboa: TC Cuadernos/Argumentum. PMCid: PMC5528623.
- Molina Gaitán, J. C., Bestué Cardiel, I., y Gutiérrez Carrillo, M. L. (2020). Manual de mantenimiento para las fortificaciones de tierra. *Manual de mantenimiento para las fortificaciones de tierra*, pp. 1–192.
- Moorehead, D. (1986). Cementation by the carbonation of hydrated lime. *Cement and Concrete research*, 16(5):700–708.
- Moreno, E. I., Lara, G. G. D., Sarabia, E. J. C., y Gómez, F. D. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. *Ingeniería*, 8(2):117–130.
- Mu, J. y Zhou, T. G. (2012). Demonstrative study of the ecological post-quake reconstruction of dwellings in poor rural regions of China. En *Advanced Materials Research*, volumen 374, pp. 339–345. Trans Tech Publ.
- Muzikova, B., Otcovska, T., y Padevet, P. (2018). Determining fracture energy of unstabilised rammed earth by using three-point bending test. *Proceedings 56th International Scientific Conference on Experimental Stress Analysis, EAN 2018*, (1):292–295.
- Nacente, F. (1890). *El constructor moderno: tratado teórico y práctico de arquitectura y albañilería*. Editorial Maxtor.
- Nagy, A. (1997). Determination of e-modulus of young concrete with nondestructive method. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9(1):15–20.
- NBE-FL-90 (1990). Muros resistentes de fábrica de ladrillo. *Ministerio de Obras Públicas y Transportes*. RD, 1723:90.
- Ngo, D. y Scordelis, A. (1967). Finite element analysis of reinforced concrete beams. *Journal Proceedings*, 64(3):152–163.
- Obert, L. y Duvall, W. I. (1941). Discussion of dynamic methods of testing concrete with suggestions for standardization. En *Proceedings*, p. 1053.
- Olcese, M. (1993). Arquitecturas de tierra: tapial y adobe. *Ed. Colegio Oficial de Arquitectos en Valladolid*.
- Ontiveros, E., Sebastián, E., Valverde, I., y Gallego, J. (2008). Estudio de los materiales de construcción de las murallas del Albayzín (Granada). *PH: boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 16(66):32–47.
- Østergaard, L. (2003). *Early age fracture mechanics and cracking of concrete: Experiments and Modelling*. Technical University of Denmark.

- Paige-Green, P. (1984). A laboratory investigation into the influence of carbonation on the strength of lime-stabilized materials. En *Regional conference for Africa*, 8, pp. 403–406.
- Planas, J. y Elices, M. (1985). Fractura del hormigón en régimen no lineal. Intentos para medir la energía de fractura GF. *Informes de la Construcción*, 37(372):35–52.
- Powers, T. (1938). Measuring young's modulus of elasticity by means of sonic vibrations. En *Proceedings*, volumen 38, p. 460. American Society for Testing and Materials.
- Quagliarini, E. y Lenci, S. (2010). The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient roman adobe bricks. *Journal of Cultural Heritage*, 11(3):309–314.
- Quintero, Luz Amparo and Cruz, Ricardo Alfredo and Peña, Deyci Yamile and others (2014). Efecto del contenido de agua sobre la resistencia y la velocidad de pulso ultrasónico del concreto. *Tecnura*, 18(42):103–113.
- Rashid, Y. R. (1968). Ultimate strength analysis of prestressed concrete pressure vessels. *Nuclear engineering and design*, 7(4):334–344.
- Rebolledo, J. A. (1875). *Construcción general*. Imprenta de J. Antonio García.
- RILEM (1994). NDT 1 testing of concrete by the ultrasonic pulse method, 1972. *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials*, pp. 73–82.
- RILEM:TCM-85 (1985). Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and structures*, 18(106):285–290.
- Robador, M. (2012). La noble cal en la restauración del patrimonio histórico: Materiales y aplicaciones. *Aparejadores*, (80):47–63.
- Rodríguez, M. R., González Serrano, A. M., Canivell, J., y Romero Girón, A. (2014). La cal de Morón en la arquitectura tradicional andaluza. *Patrimonio cultural de España*, 8, 213-227.
- Roesler, J., Paulino, G. H., Park, K., y Gaedicke, C. (2007). Concrete fracture prediction using bilinear softening. *Cement and Concrete Composites*, 29(4):300–312.
- Rosone, M., Megna, B., y Celauro, C. (2019). Analysis of the chemical and microstructural modifications effects on the hydro-mechanical behaviour of a lime-treated clay. *International Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 1–14.
- Sansalone, M. y Carino, N. J. (1986). *Impact-echo: A method for flaw detection in concrete using transient stress waves*. US Department of Commerce, National Bureau of Standards, Center for Building Technology, Structures Division.
- Šauman, Z. (1971). Carbonization of porous concrete and its main binding components. *Cement and Concrete Research*, 1(6):645–662.
- Schaeffer, K., Bearce, R., y Wang, J. (2013). Dynamic modulus and damping ratio measurements from free-free resonance and fixed-free resonant column procedures. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 139(12):2145–2155.

- Schroeder, H. (2011). Moisture transfer and change in strength during the construction of earthen buildings. *Informes de la Construcción*, 63(523):107–116.
- Selwitz, C. (1995). Saving the fort selden ruins: the use of a composite blend of chemicals to stabilize fragile historic adobe. *Conservation and management of archaeological sites*, 1(2):109–116.
- Sensi, B. (2003). Terracuda, la diffusione dell'architettura di terra. *Soil, the dissemination of earth architecture*, 2.
- Sethna, Z. (2008). A sustainability approach to standards for rammed earth construction in Bhutan. *University of Cambridge: Fourth-year undergraduate project*.
- Shah, S. y Slate, F. (1968). Internal microcracking, mortar-aggregate bond and the stress-strain curve of concrete.
- Shah, S. P., Swartz, S. E., y Ouyang, C. (1995). *Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*. John Wiley & Sons.
- Shi, Z. (2009). *Crack analysis in structural concrete: theory and applications*. Butterworth-Heinemann.
- Shrestha, K., Aoki, T., Miyamoto, M., Wangmo, P., y Pema (2020). In-plane shear resistance between the rammed earth blocks with simple interventions: Experimentation and finite element study. *Buildings*, 10(3):57.
- Stang, H., Olesen, J. F., Poulsen, P. N., y Dick-Nielsen, L. (2007). On the application of cohesive crack modeling in cementitious materials. *Materials and Structures*, 40(4):365–374.
- Stanton, T. E. (1944). Tests comparing the modulus of elasticity of portland cement concrete as determined by the dynamic (sonic) and compression (secant at 1000 psi) methods. *ASTM Bulletin*, 131:17–20.
- Swallow, P. y Carrington, D. (1995). Limes and lime mortars part one. *Journal of Architectural Conservation*, 1(3):7–25.
- Thompson, W. (1940). Measuring changes in physical properties of concrete by the dynamic method. *American Soc Testing & Materials Proc.*
- Toufigh, V. y Kianfar, E. (2019). The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 200:616–629.
- UNE-EN:12390-1 (2014). Ensayos de hormigón endurecido. *Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes*, p. 16.
- UNE-EN:12390-13 (2014). Ensayos de hormigón endurecido. *Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión*, p. 18.
- UNE-EN:12390-3 (2019). Ensayos de hormigón endurecido. *Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*, p. 24.

- UNE-EN:12504-4 (2006). Ensayos de hormigón en estructuras. *Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos*, p. 18.
- UNE-EN:12680-1 (2007). Métodos de ensayo para productos refractarios. *Parte 1: Determinación del módulo de Young dinámico (MOE) por excitación de la vibración por impulso*, p. 18.
- UNE-EN:196-1 (2018). Métodos de ensayo de cementos. *Parte 1: Determinación de resistencias*, p. 38.
- UNE-EN:459-1 (2011). Cales para la construcción. *Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad*, p. 50.
- UNE-EN:772-1+A1:2016 (2016). Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. *Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión*, p. 16.
- UNE-EN:933-1 (2012). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. *Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*.
- UNE:13295-05 (2005). Productos y sistema para la protección y reparación de estructuras de hormigón. *Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia a la carbonatación*, p. 18.
- UNE:14630-07 (2007). Productos y sistema para la protección y reparación de estructuras de hormigón. *Métodos de ensayo. Determinación de la profundidad de carbonatación en un hormigón endurecido por el método de la fenolftaleína*, p. 10.
- UNE:41410-08 (2008). Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. *Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*, p. 28.
- Valverde-Espinosa, I., Ontiveros-Ortega, E., y Sebastián-Pardo, E. (1997). El tapial de las murallas de Granada.
- Van Balen, K. (2003). Understanding the lime cycle and its influence on historical construction practice. En *Proceedings of the First International Congress on Construction History*, volumen 20, p. 24th. Instituto Juan de Herrera Universidad Politécnica de Madrid.
- Vénuat, M. y Alexandre, J. (1969). De la carbonatation du beton, 3 [on the carbonation of concrete, 3]. *Revue des Materiaux de Construction*, (640):5–15.
- Verbeck, G. (1958). Carbonation of hydrated portland cement. En *Cement and Concrete*. ASTM International.
- Vesely, V. y Frantík, P. (2014). An application for the fracture characterisation of quasi-brittle materials taking into account fracture process zone influence. *Advances in Engineering Software*, 72:66–76.
- Villanueva, J. D. (1827). *Arte de albañilería o instrucciones para los jóvenes que se dediquen al él*. Editorial MAXTOR, facsimil 2008.
- Walker, P. (2002). The australian earth building handbook. En *The Australian Earth Building Handbook*. SAI Global Limited.

- Ward-Perkins, J. B. (1994). *Roman imperial architecture*. Yale University Press.
- Watson, L. y McCabe, K. (2011). The cob building technique. Past, present and future. *Informes de la Construcción-Revista*, 63(523):59.
- Wenglas, G. (2008). Quality evaluation of portland cement concrete at early age with free-free resonant column.
- Wittmann, F., Rokugo, K., Brühwiler, E., Mihashi, H., y Simonin, P. (1988). Fracture energy and strain softening of concrete as determined by means of compact tension specimens. *Materials and Structures*, 21(1):21–32.
- Wolinski, S., Hordijk, D. A., Reinhardt, H. W., y Cornelissen, H. A. (1987). Influence of aggregate size on fracture mechanics parameters of concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 9(2):95–103.
- Yang, Z. y Deeks, A. (2007). Fully-automatic modelling of cohesive crack growth using a finite element–scaled boundary finite element coupled method. *Engineering Fracture Mechanics*, 74(16):2547–2573.
- Young, J. F., Mindess, S., y Darwin, D. (2002). *Concrete*. Prentice Hall.