

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES
AMBIENTALES EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE
SISTEMAS ESTRUCTURALES DE TIERRA**

Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería Civil

Presentado por:

Ing. Rick Milton Delgadillo Ayala

ASESOR

Dr. Rafael Aguilar Velez

CO-ASESORES

Dr. Rubén Boroschek Krauskopf

Dr. Miguel Pando

Lima, Abril 2017



*A mis padres Nilton Delgadillo y Teresa Ayala,
mis hermanas Angela y Karol por su indomitable
esfuerzo, sabios consejos y apoyo incondicional en
cada etapa de mi vida.*

Agradecimientos

-) Al prestigioso grupo de investigación *Engineering and Heritage* del Laboratorio de investigación en el registro, diagnóstico y conservación del patrimonio de la Pontificia Universidad Católica del Perú, siempre a la vanguardia de la ingeniería sísmica y estructural.
-) Al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) por brindarme la oportunidad de realizar la presente investigación y de esta manera poder contribuir al desarrollo del país.
-) Al Dr. Rafael Aguilar Velez, Dr. Rubén Boroschek Krauskopf y Dr. Miguel Pando por su tiempo, consejos, dedicación y asesoramiento en la presente investigación.
-) A la Pontificia Universidad Católica del Perú, alma máter, por acogerme en sus aulas durante mi vida universitaria en el Posgrado de la Maestría en Ingeniería Civil.
-) A FONDECYT por el financiamiento de la beca de estudios de posgrado (Contrato N ° 027-2015-FONDECYT).
-) A Cienciactiva del CONCYTEC por proveer fondos para desarrollar la investigación “Monitoreo Remoto de la Salud Estructural de Edificaciones Emblemáticas de Adobe: Integración de Conocimiento y Tecnología para un Diagnóstico Estructural Adecuado” (PROYECTO ID 222-2015 FONDECYT) en el marco de la cual se ha ejecutado el presente trabajo.
-) Al Laboratorio de Estructuras y al Laboratorio de Mecánica de suelos por la disponibilidad de sus instalaciones y equipos.
-) A mis grandes amigos ingenieros civiles Eduardo Ramírez, Giacomo Zonno, Mauricio Gonzales, Carolina Briceño, Cristian Saucedo, Mijaíl Montesinos por su gran apoyo y constante interés por la investigación. De la misma manera agradezco a los futuros ingenieros electrónicos Marcos Burgos, Cristian Yaranga, David Fosca y Carlos Yaya por su gran ayuda, consejos y su invaluable amistad.

Resumen

El comportamiento dinámico de las estructuras patrimoniales y modernas se ven afectadas por las condiciones medio ambientales ya que pueden enmascarar los cambios de las propiedades de vibración causados por el daño estructural. Las propiedades dinámicas son a menudo sensibles a los cambios de los factores ambientales que a su vez son variables generalmente no uniformes y dependientes del tiempo. La fácil toma de datos ambientales de las estructuras nos permite obtener modelos útiles para entender la relación entre las propiedades dinámicas y los efectos ambientales.

La presente investigación tiene como objetivo presentar los resultados de cuantificar los efectos de las condiciones ambientales sobre las propiedades dinámicas de construcciones de tierra mediante pruebas de laboratorio. Como primer paso se construyeron especímenes cilíndricos de tierra para evaluar el proceso de secado en un ambiente controlado mediante el monitoreo continuo de la temperatura y humedad. El segundo paso fue construir un espécimen de acero para validar la metodología de automatización del monitoreo dinámico y ambiental. Como último paso se construyeron en el laboratorio de la PUCP tres muros de adobe que repliquen las características del material y las dimensiones de los muros del Complejo Arqueológico Huaca de La Luna (Trujillo-Perú). Por último se desarrolló un programa de monitoreo continuo a largo plazo que registra el comportamiento dinámico y ambiental y se realizó la correlación para lo cual se construyeron y compararon modelos estadísticos ARX y MLRM. El trabajo presenta los resultados de las mediciones y muestra que es posible distinguir los cambios de propiedades dinámicas debido a los efectos ambientales en sistemas estructurales de tierra. De la misma manera se comprobó experimentalmente la existencia de dos etapas en el monitoreo continuo de los muros: primero una etapa de secado y segundo una etapa de operación. Finalmente se obtuvo el tiempo de retraso de la temperatura interna y externa y cómo influye en el espesor de los muros ya que el material tierra tiene la propiedad de almacenar calor.

Palabras clave: mampostería de adobe, monitoreo de salud estructural, efectos ambientales, monitoreo higo-térmico, pruebas de laboratorio.

Índice General

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Índice General.....	iii
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas.....	xii

1 Introducción	1
1.1 Motivación	2
1.2 Objetivos de la tesis	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Metodología	3
1.4 Organización de la tesis	4
1.5 Resultados.....	5
2 Revisión de antecedentes y marco teórico.....	6
2.1 Introducción	7
2.2 Monitoreo de salud estructural	7
2.3 Efecto de los factores ambientales.....	9
2.4 Estudios previos realizados en tierra.....	12
2.5 Métodos de correlación entre propiedades dinámicas y factores ambientales	14
2.5.1 Regresión multiparamétrica lineal.....	14
2.5.2 Modelo autoregresivo con variable exógena (ARX).....	15
3 Evaluación de la humedad y temperatura durante el proceso de secado de especímenes de tierra.....	17
3.1 Introducción	18
3.2 Caracterización del material y propiedades físicas	18

3.2.1	Ensayo de límite líquido y plástico (ASTM D-4318).....	18
3.2.2	Ensayo de análisis granulométrico (ASTM D-422)	20
3.3	Caracterización mecánica de especímenes de tierra	21
3.3.1	Descripción de la prensa mecánica.....	21
3.3.2	Proceso de fabricación de especímenes de tierra.....	22
3.3.3	Ensayo de compresión uniaxial	23
3.3.4	Resultados y discusión	24
3.4	Ensayos de monitoro continuo de temperatura y humedad	25
3.4.1	Sensor de temperatura y humedad interna.....	25
3.4.2	Sensor ambiental	30
3.4.3	Sistema de adquisición de datos	31
3.4.4	Software de desarrollo de sistemas NI LabView.....	31
3.4.5	Monitoreo continuo de temperatura y humedad.....	32
3.5	Análisis e interpretación de resultados	34
3.5.1	Distribución de la temperatura	34
3.5.2	Distribución de la humedad.....	34
3.5.3	Propuesta de curvas de aproximación	37
4	Validación experimental de la influencia de la temperatura y humedad en un péndulo de metal.....	39
4.1	Introducción	40
4.2	Descripción de los sensores de medición y sistemas de adquisición.....	40
4.3	Ensayo experimental de monitoreo dinámico y ambiental	41
4.3.1	Descripción del espécimen estudiado.....	41
4.3.2	Análisis modal del espécimen de acero	43
4.3.3	Identificación modal automática	43
4.3.4	Monitoreo de parámetros ambientales.....	45
4.4	Correlación entre las frecuencias identificadas y factores ambientales.....	46
4.5	Ensayo de calentamiento.....	48
5	Monitoreo dinámico y ambiental de muros de adobe	51
5.1	Introducción	52

5.2	Monitoreo de factores ambientales en unidades de adobe.....	53
5.2.1	Caracterización de materiales.....	53
5.2.2	Elaboración de unidades de adobe.....	53
5.2.3	Instrumentación de unidades de adobe.....	55
5.2.4	Resultados y discusión.....	55
5.3	Monitoreo continuo de tres muros de adobe.....	57
5.3.1	Proceso constructivo de muros de adobe.....	58
5.3.2	Descripción de sensores y sistemas de adquisición de datos.....	60
5.3.3	Instrumentación de muros de adobe.....	61
5.4	Análisis e interpretación de resultados.....	63
5.4.1	Identificación modal automática.....	63
5.4.2	Análisis modal de los muros de adobe.....	64
5.4.3	Identificación automática de factores ambientales.....	65
5.5	Correlación entre las frecuencias identificadas y los parámetros ambientales.....	71
5.6	Regresión multiparamétrica lineal (MLRM).....	82
5.7	Modelo Auto-Regresivo con variable Exógena (ARX).....	87
5.7.1	Elección de modelos.....	87
5.7.2	Modelos con mejor ajuste.....	87
6	Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.....	93
6.1	Conclusiones.....	94
6.1.1	Evaluación del tiempo de secado en probetas de tierra.....	94
6.1.2	Monitoreo dinámico y ambiental de un espécimen de acero.....	94
6.1.3	Monitoreo dinámico y ambiental de tres muros de adobe.....	95
6.2	Recomendaciones.....	97
6.3	Trabajos Futuros.....	97
	Referencias.....	98
	Anexos.....	102
	Anexos del Capítulo 3.....	103
	Anexos del Capítulo 5.....	106

Índice de Figuras

Figura 2.1 Sistema de monitoreo en estructuras modernas e históricas (a) Puente Stonecutters (Hong Kong) (b) El campanario de la Basílica de San Pietro (Italia)	8
Figura 2.2 Resultados de cambios en la temperatura y propiedades dinámicas. (a) Cambio en la primera frecuencia durante 24 horas (b) Relación entre la primera frecuencia y la variación de temperatura. Adaptado de (Cornwell, et al., 1999).....	10
Figura 2.3 Resultados del monitoreo de frecuencia y temperatura. (a) Frecuencias de la Torre Central (b) Variación estacional de frecuencias debido a la temperatura durante 1 año de monitoreo continuo. Adaptado de (Tamayo, 2014).....	11
Figura 2.4 Monitoreo de frecuencia y temperatura en un puente de concreto y acero. (a) Gradiente de temperatura (b) Variación de frecuencias con la temperatura. Adaptado de (Yan, 2005).....	11
Figura 2.5 Monitoreo de frecuencia y temperatura en una losa de concreto armado. (a) Losa de concreto armado (b) Variación de la primera frecuencia versus la temperatura. Adaptado de (Xia, et al., 2010)	12
Figura 2.6 Estudio de las características dinámicas de tierra apisonada. (a) Castillo de Lavort (Francia) (b) Frecuencias de vibración. Adaptado de (Bui et al., 2005)	13
Figura 2.7 Historial temporal de las frecuencias naturales y los datos de temperatura. Adaptado de (Ubertini, et al., 2016)	14
Figura 3.1 Ensayos de límites de Atterberg (a) Preparación de muestras. (b) Golpes con la cuchara de Casagrande. (c) Peso de muestra para el límite líquido. (d) Peso de la muestra para el límite plástico.....	19
Figura 3.2 Número de golpes versus contenido de Humedad.	19
Figura 3.3 Ensayos de granulometría, método del tamizado (a) Muestras que pasan las diferentes mallas. (b) Colección de tamices. (c) Sarandeo de las partículas. (d) Peso de las partículas retenidas en los tamices.....	20
Figura 3.4 Ensayos de granulometría, método del hidrómetro (a) Peso de la muestra. (b) Materiales para el batido de la mezcla. (c) Agitación de la muestra. (d) Proceso de sedimentación en diferentes horas	20
Figura 3.5 Curva granulométrica para las 3 muestras	21

Figura 3.6 Descripción de la máquina para fabricación de probetas (a) Prensa mecánica (b) Tolva de la máquina (c) Caja de fabricación de probetas (máximo 3 probetas) (d) Tubos metálicos en donde se coloca el material de suelo (e) Pistones mecánicos.....	21
Figura 3.7 Etapas para la fabricación de especímenes de tierra (a) Trituración (b) Tamizado (c) Mezclado con agua (d) Compactación (e) Colocación de sensores (f) Expulsión de probetas (g) Enrazado (h) Monitoreo continuo	23
Figura 3.8 Especímenes de tierra el día de la fabricación	23
Figura 3.9 Máquina universal de carga modelo Swick/Roell Z050 para realizar los ensayos a compresión de especímenes de tierra.....	24
Figura 3.10 Probetas ensayadas a compresión	24
Figura 3.11 Evolución de la resistencia a la compresión de los especímenes de tierra	25
Figura 3.12 Sensor de temperatura LM-35 y su esquema eléctrico	26
Figura 3.13 Sensor de humedad FC-28 y su esquema eléctrico.....	26
Figura 3.14 Permitividades “ ϵ ” de diferentes materiales	27
Figura 3.15 Muestras con diferente contenido de humedad (a) 0%, (b) 6%, (c) 18% (d) 24% (e) 30%	28
Figura 3.16 Mediciones de humedad (a) Sistema de adquisición de datos (b) Obtención de voltajes.....	29
Figura 3.17 Correlación entre el contenido de humedad volumétrico y la obtenida con el sensor FC-28.....	29
Figura 3.18 Sensor integrado de temperatura y humedad ambiental	30
Figura 3.19 Dispositivo de adquisición de datos y conexión (a) USB6003 (b) USB6225	31
Figura 3.20 Panel frontal VI del programa desarrollado para el monitoreo ambiental.....	32
Figura 3.21 (a) Dimensiones de las probetas de tierra (b) Probetas instrumentadas en la caja de tecnopor (c) Sistema de monitoreo de especímenes de tierra.....	33
Figura 3.22 Descripción para obtener el contenido de humedad en probetas (a) Esquema de distribución a lo largo (b) Cortes transversales de la probeta (c) Cortes internos de la probeta (d) Esquema de distribución a lo ancho (e) Muestras listas para llevar al horno	33
Figura 3.23 Evolución del contenido de humedad de los especímenes de tierra..	34
Figura 3.24 Variación de temperatura y humedad al interior de las probetas de tierra (a) Registro completo de la Probeta 1 (b) Probeta 1 (c) Probeta 2 (d) Probeta 3 (e) Probeta 4	35
Figura 3.25 Variación de temperatura y humedad ambiental. (a) Al interior del ambiente controlado (b) Al exterior del ambiente controlado	36
Figura 3.26 Variación de temperatura y humedad interna. (a) Todas las probetas (b) Promedio de las 3 probetas.....	36

Figura 3.27 Comparación de todos los parámetros ambientales (a) Probeta 1 (b) Probeta 2 (c) Probeta 4.....	37
Figura 3.28 Curvas de aproximación de la humedad y temperatura al interior de las probetas de tierra.....	38
Figura 3.29 Correlación entre el contenido de humedad y la resistencia a compresión	38
Figura 4.1 Sensores de aceleración y sistema de adquisición: (a) acelerómetros PCB Piezotronics (dimensiones en mm) (b) Sistema de adquisición DAQ modelo NI 9234	41
Figura 4.2 Descripción del espécimen de acero (a) péndulo ubicado en el laboratorio (b) Características geométricas (dimensiones en m.).....	42
Figura 4.3 Formas de vibración del péndulo invertido de metal (a) Modelo numérico en TNO DIANA (b) Modo 1 (c) Modo 2 (d) Modo 3.....	43
Figura 4.4 Ubicación de acelerómetros	44
Figura 4.5 Identificación modal automática (a) Frecuencias naturales identificadas (b) Variación de las dos primeras frecuencias debido al peso adicional.....	44
Figura 4.6 Monitoreo de factores ambientales (a) Instrumentación ambiental del espécimen de acero (b) Variación de los factores ambientales temperatura y humedad	45
Figura 4.7 Correlación entre frecuencias y temperatura ambiental durante los 3 meses y durante 2 días (a) Frecuencia 1 y temperatura (b) Frecuencia 2 y temperatura (c) Frecuencia 3 y temperatura.	46
Figura 4.8 Correlación entre frecuencias y humedad ambiental durante los 3 meses y durante 2 días (a) Frecuencia 1 y humedad (b) Frecuencia 2 y humedad (c) Frecuencia 3 y humedad	47
Figura 4.9 Ley constitutiva térmica del acero. Adaptado de (Yan, 2005).....	47
Figura 4.10 Frecuencias versus temperatura (a) Frecuencia 1 vs temperatura (b) Frecuencia 2 vs temperatura (c) Frecuencia 3 vs temperatura.....	48
Figura 4.11 Frecuencias versus humedad (d) Frecuencia 1 vs humedad (e) Frecuencia 2 vs humedad (f) Frecuencia 3 vs humedad.....	48
Figura 4.12 Ensayo de calentamiento (a) Detalle de la instrumentación (b) Especimen ensayado con incremento de la temperatura.....	49
Figura 4.13 Variación de frecuencia 1 por incremento inducido de temperatura (a) Incremento de temperatura ambiente (b) Disminución de humedad relativa.....	49
Figura 4.14 Variación de frecuencia 2 por incremento inducido de temperatura (a) Incremento de temperatura ambiente (b) Disminución de humedad relativa.....	50
Figura 4.15 Variación de frecuencia 3 por incremento inducido de temperatura (a) Incremento de temperatura ambiente (b) Disminución de humedad relativa.....	50

Figura 5.1 Complejo arqueológico Huaca de La Luna (a) El monumento se localiza al pie del cerro blanco en la ciudad de Trujillo - Perú (b) Estructura interna de Huaca de La Luna. Adaptado de (Zvietcovich et al., 2015)	52
Figura 5.2 Forma geométrica y tipo de material de los adobes (a) unidad original de Huaca (b) unidad fabricada (c) Comparación de curvas granulométricas	53
Figura 5.3 Proceso constructivo de unidades de adobes (a) cernir la tierra (b) humedecer la tierra (c) mezclado mecánico (d) enrazado de adobes (e) colocación de adobes (f) apilado de adobes	54
Figura 5.4 Proceso de instrumentación de unidades de adobes (a) Colocación de la mezcla de tierra al molde (b) Sensor de humedad FC-28 y de temperatura LM-35 (c) Detalle de ubicación de sensores (d) Adobe instrumentado (e) Adobes secos.....	55
Figura 5.5 Registros de temperatura y humedad en bloques de adobe (a) Al interior de adobe #1 (b) Al interior de adobe #2 (c) Al interior de adobe #3 (d) En el medio ambiente	56
Figura 5.6 Tipos de muros de adobe (mediciones en m) (a) Muro tipo I de 0.22 m de espesor (b) Muro tipo II de 0.56 m de espesor (c) Muro tipo III de 0.8 m de espesor.....	57
Figura 5.7 Ubicación y tipos de muros (dimensiones en m) (a) Ubicación de muros originales (b) Muro de 0.22m de espesor (c) Muro de 0.56m de espesor (d) Muro de 0.80m de espesor.	57
Figura 5.8 Proceso constructivo muro tipo I (a) Sobrecimiento de concreto (b) Colocación de adobes en la base (c) Colocación de sensores (d) Muro a la mitad (e) Continuación del muro (f) Muro terminado.....	58
Figura 5.9 Proceso constructivo muro tipo II (a) Sobrecimiento de concreto (b) Colocación de adobes en la base (c) Colocación de sensores (d) Muro a la mitad (e) Continuación del muro (f) Muro terminado.....	59
Figura 5.10 Proceso constructivo muro tipo III (a) Sobrecimiento de concreto (b) Colocación de adobes en la base (c) Colocación de sensores (d) Muro a la mitad (e) Continuación del muro (f) Muro terminado	59
Figura 5.11 Panel frontal VI de los programas desarrollados para el monitoreo (a) dinámico (b) ambiental.....	60
Figura 5.12 Esquema de la instrumentación del muro tipo I (A, H, T denotan los sensores de aceleración, humedad y temperatura respectivamente)	61
Figura 5.13 Esquema de la instrumentación del muro tipo II (A, H, T denotan los sensores de aceleración, humedad y temperatura respectivamente)	61
Figura 5.14 Esquema de la instrumentación del muro tipo III (A, H, T denotan los sensores de aceleración, humedad y temperatura respectivamente)	62
Figura 5.15 Lugar de emplazamiento y centro de monitoreo continuo de tres muros de adobe	62
Figura 5.16 Centro de monitoreo continuo (a) dinámico (b) ambiental.....	62

Figura 5.17 Frecuencias naturales identificadas para los tres muros de adobe (a) Muro tipo I (b) Muro tipo II (c) Muro tipo III.....	63
Figura 5.18 Formas de modos de tres muros de adobe (a) Muro tipo I (b) Muro tipo II (c) Muro tipo III.....	65
Figura 5.19 Variación de temperatura y humedad en diferentes secciones transversales para el muro tipo I.....	67
Figura 5.20 Variación de temperatura y humedad en diferentes secciones transversales para el muro tipo II.....	68
Figura 5.21 Variación de temperatura y humedad en diferentes secciones transversales para el muro tipo III.....	69
Figura 5.22 Comparación entre parámetros ambientales según el espesor de los muros (a) Temperatura (b) Lapso de tiempo en la temperatura (c) Humedad.....	71
Figura 5.23 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo I (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.....	73
Figura 5.24 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo II (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.....	74
Figura 5.25 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo III (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.....	76
Figura 5.26 Registros de frecuencias y parámetros ambientales para el muro tipo I (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.....	77
Figura 5.27 Registros de frecuencias y parámetros ambientales para el muro tipo II (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.....	78
Figura 5.28 Registros de frecuencias y parámetros ambientales para el muro tipo III (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.....	79
Figura 5.29 Desfase entre frecuencias y temperatura ambiental (a) Muro tipo I (b) Muro tipo II (c) Muro tipo III.....	81
Figura 5.30 Desfase entre frecuencias y humedad ambiental (a) Muro tipo I (b) Muro tipo II (c) Muro tipo III.....	82
Figura 5.31 Modelos de regresión multiparamétrica (Temperatura interna) para el muro tipo I (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.....	83
Figura 5.32 Modelos de regresión multiparamétrica (Temperatura interna) para el muro tipo II (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.....	85
Figura 5.33 Modelos de regresión multiparamétrica (Temperatura interna) para el muro tipo III (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.....	86
Figura 5.34 Modelos ARX (Temperatura interna) para el muro tipo I (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.....	88

Figura 5.35 Modelos ARX (Temperatura interna) para el muro tipo II (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.....	89
Figura 5.36 Modelos ARX (Temperatura interna) para el muro tipo III (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.....	90
Figura A.1 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo I (a) Frecuencia 1 y temperaturas internas (b) Frecuencia 1 y humedades internas.....	106
Figura A.2 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo I (a) Frecuencia 2 y temperaturas internas (b) Frecuencia 2 y humedades internas.....	106
Figura A.3 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo I (a) Frecuencia 3 y temperaturas internas (b) Frecuencia 3 y humedades internas.....	107
Figura A.4 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo I (a) Frecuencia 4 y temperaturas internas (b) Frecuencia 4 y humedades internas.....	107
Figura A.5 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo II (a) Frecuencia 1 y temperaturas internas (b) Frecuencia 1 y humedades internas.....	108
Figura A.6 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo II (a) Frecuencia 2 y temperaturas internas (b) Frecuencia 2 y humedades internas.....	108
Figura A.7 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo II (a) Frecuencia 3 y temperaturas internas (b) Frecuencia 3 y humedades internas.....	109
Figura A.8 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo II (a) Frecuencia 4 y temperaturas internas (b) Frecuencia 4 y humedades internas.....	109
Figura A.9 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo III (a) Frecuencia 1 y temperaturas internas (b) Frecuencia 1 y humedades internas.....	110
Figura A.10 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo III (a) Frecuencia 2 y temperaturas internas (b) Frecuencia 2 y humedades internas.....	110
Figura A.11 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo III (a) Frecuencia 3 y temperaturas internas (b) Frecuencia 3 y humedades internas.....	111
Figura A.12 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo III (a) Frecuencia 4 y temperaturas internas (b) Frecuencia 4 y humedades internas.....	111

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Determinación del límite líquido.....	19
Tabla 3.2 Determinación del límite plástico.....	19
Tabla 3.3 Límites de consistencia.....	20
Tabla 3.4 Valores de permitividad dieléctrica de algunos materiales	27
Tabla 3.5 Variación de humedad y temperatura al interior de las probetas	36
Tabla 4.1 Primeras dos frecuencias obtenidas a través de la ecuación 4.1.....	43
Tabla 4.2 Resumen de frecuencias de vibración para el espécimen de acero	45
Tabla 4.3 Resultados estadísticos del espécimen de acero	45
Tabla 5.1 Variación de humedad y temperatura al interior de los bloques de adobe	56
Tabla 5.2 Variación de frecuencias durante el proceso de secado de los muros de adobe..	64
Tabla 5.3 Parámetros modales identificados mediante el análisis modal en SAP 2000	65
Tabla 5.4 Resultados estadísticos del muro tipo I.	74
Tabla 5.5 Resultados estadísticos del muro tipo II.....	75
Tabla 5.6 Resultados estadísticos del muro tipo III.....	76
Tabla 5.7 R^2 de los modelos MLRM para la estimación y validación del muro tipo I.	84
Tabla 5.8 R^2 de los modelos MLRM para la estimación y validación del muro tipo II.....	85
Tabla 5.9 R^2 de los modelos MLRM para la estimación y validación del muro tipo III.....	87
Tabla 5.10 Coeficientes de ajuste y R^2 de los modelos ARX del muro tipo I.....	88
Tabla 5.11 Coeficientes de ajuste y R^2 de los modelos ARX del muro tipo II.....	89
Tabla 5.12 Coeficientes de ajuste y R^2 de los modelos ARX del muro tipo III	90
Tabla 5.13 Comparación de los modelos de estimación del MLRM y ARX utilizando el RMSE	91
Tabla 5.14 Comparación de los modelos de validación del MLRM y ARX utilizando el RMSE	92
Tabla A.1 Análisis granulométrico por tamizado de la muestra 1.	103
Tabla A.2 Análisis granulométrico por tamizado de la muestra 2.	103

Tabla A.3 Análisis granulométrico por tamizado de la muestra 3.	104
Tabla A.4 Análisis granulométrico por sedimentación de la muestra 1.....	104
Tabla A.5 Análisis granulométrico por sedimentación de la muestra 2.....	105
Tabla A.6 Análisis granulométrico por sedimentación de la muestra 3.....	105
Tabla A.7 R^2 entre las frecuencias modales y la temperatura y humedad interna para el muro tipo I.....	112
Tabla A.8 R^2 entre las frecuencias modales y la temperatura y humedad interna para el muro tipo I.....	112
Tabla A.9 R^2 entre las frecuencias modales y la temperatura y humedad interna para el muro tipo I.....	113



Capítulo 1

Introducción



1.1 Motivación

La conservación de construcciones patrimoniales e históricas es de gran importancia para todos los países debido a que este tipo de construcciones no solo forman parte del patrimonio cultural sino también se resalta el gran interés histórico que poseen. De la misma manera contribuyen significativamente a la economía de ciudades por ser principales atractivos llenos de historia, tradiciones y arte. El Perú es considerado un país con un importante patrimonio cultural debido a que se desarrollaron grandes culturas las cuales dejaron grandes vestigios y construcciones históricas. Sin embargo, en el país no se desarrollan programas para la conservación, intervención o monitoreo de salud estructural de este tipo de estructuras. La falta de práctica e interés, en conjunto con la ocurrencia de movimientos sísmicos y otros factores como los efectos de las condiciones ambientales (temperatura, humedad, precipitación, etc) está generando la desaparición de nuestro legado histórico.

Las diversas estructuras tanto patrimoniales como contemporáneas experimentan un deterioro progresivo debido al daño estructural que se produce bajo la influencia de factores ambientales. Es por este motivo que es importante la identificación de las propiedades dinámicas basados en vibraciones y el monitoreo de la salud estructural durante toda la vida útil de las construcciones. De la misma manera es importante poder identificar los efectos que producen los factores ambientales en las propiedades dinámicas de sistemas estructurales de tierra. Esto con el fin de poder ampliar los conocimientos en el estudio de estructuras históricas ya que en la actualidad no se tienen muchas investigaciones (Ubertini, et al., 2016).

1.2 Objetivos de la tesis

1.2.1 Objetivo General

El objetivo principal de la tesis es determinar la influencia de la temperatura y humedad en las propiedades dinámicas de sistemas estructurales de tierra y acero a partir del monitoreo continuo de la salud estructural.

1.2.2 Objetivos específicos

Realizar una investigación bibliográfica sobre el efecto de los factores ambientales en las propiedades dinámicas de sistemas estructurales de tierra.

Realizar una investigación bibliográfica sobre la efectividad de diversos modelos estadísticos que permiten identificar la influencia de los factores ambientales en las propiedades dinámicas de sistemas estructurales.

Estudiar el proceso de secado en especímenes de tierra mediante el monitoreo continuo de la temperatura y humedad (interna y externa) colocados al interior de un ambiente controlado.

Estudiar el efecto de los factores ambientales en las propiedades dinámicas de 3 muros de adobe que repliquen las características geométricas y del material de los muros del Complejo arqueológico Huaca de La Luna – Trujillo (Perú).

Evaluar en forma experimental el efecto que producen los factores ambientales en la variación de las propiedades dinámicas del acero mediante la construcción de un péndulo invertido.

1.3 Metodología

Se realizó una revisión bibliográfica en artículos indexados, libros y tesis acerca de sistemas de monitoreo de salud estructural incluyendo el estudio de propiedades dinámicas y ambientales en construcciones patrimoniales y modernas. Se investigaron las aplicaciones que se han realizado y de qué manera se han aplicado las metodologías existentes en estructuras patrimoniales y contemporáneas determinando sus alcances y resultados.

En primer lugar se realizó una campaña experimental que consistió en la evaluación del tiempo de secado de especímenes de tierra que fueron monitoreados al interior de un ambiente controlado. Para lo cual se controlaron los factores ambientales externos e internos como la temperatura y humedad y de la misma manera se fue midiendo la resistencia a la compresión conforme fue cambiando el contenido de humedad a lo largo del tiempo.

En segundo lugar se diseñó un espécimen de acero con el fin de validar la herramienta de identificación automática de los parámetros dinámicos mediante el monitoreo continuo. De la misma manera se obtuvieron los parámetros ambientales de temperatura y humedad y se estudió el efecto de estos en las propiedades dinámicas del acero.

Como tercer lugar se construyeron tres muros de adobe de diferentes espesores los cuales fueron instrumentados con sensores de aceleración, temperatura y humedad para ser monitoreados durante varios meses. Durante el tiempo del monitoreo continuo se obtuvieron los parámetros dinámicos (frecuencias) y ambientales (temperatura y humedad) de forma automática y para propósitos de adquisición y procesamiento de datos se desarrolló un código en LabVIEW (Labview, 2015). De la misma manera se estudiaron e implementaron en el software Matlab (Matlab, 2013) los modelos auto-regresivos con variable exógena (ARX) y el modelo de regresión multiparamétrica lineal (MLRM) para correlacionar las propiedades dinámicas y ambientales.

Las propiedades dinámicas se obtuvieron con un procedimiento automatizado utilizando el método de Identificación de Subespacio Estocástico (SSI-Data) en conjunto con un nuevo proceso de análisis automático para limpiar el diagrama de estabilización (Boroshek y Bilbao, 2015).

Por último se realizaron modelos predictivos considerando los factores ambientales como datos de ingreso y se obtuvieron predicciones de las frecuencias de vibración. El modelo dinámico ARX se utilizó para calcular predicciones considerando valores previos de las variables dependientes (Ljung, 1999). El modelo de regresión multiparamétrica lineal (MLRM) se utilizó para analizar la relación entre una sola variable dependiente y varias variables independientes (predictor) (Johnson, 1992). En esta investigación el análisis de regresión se desarrolló a partir de un conjunto de variables dependientes (frecuencias) y un conjunto de variables independientes (factores ambientales: temperatura y humedad).

1.4 Organización de la Tesis

Los sistemas de monitoreo de salud estructural (SHM por sus siglas en inglés) están siendo cada vez más utilizados en muchos campos de la ciencia e ingeniería desarrollando técnicas cada vez más sofisticadas. En la presente investigación se desarrolla un sistema de monitoreo dinámico y ambiental totalmente automatizado y se estudia la influencia de los factores ambientales en las propiedades dinámicas de sistemas estructurales de tierra. Para lo cual la Tesis ha sido organizada en seis capítulos de tal manera que se mantiene un orden lógico y secuencial, teniendo en cuenta las investigaciones previas, los métodos para obtener las propiedades dinámicas y la evaluación de los efectos ambientales. En primer lugar se evaluó el tiempo de secado de especímenes de tierra mediante el monitoreo continuo y automatizado de factores ambientales (temperatura y humedad). Luego se diseñó un péndulo invertido de acero para validar el sistema de monitoreo dinámico y evaluar cómo afectan la temperatura y humedad ambiental en las frecuencias de vibración. Por último se construyeron tres muros de adobe que representan las propiedades geométricas y del material de los muros del Complejo arqueológico Huaca de La Luna para estudiar la influencia de los factores ambientales en las propiedades dinámicas.

Capítulo 1: Introducción. En este capítulo se justifica el tema de Tesis de la presente investigación, se definen los objetivos y se esquematiza el contenido, la metodología y los alcances.

Capítulo 2: Revisión de antecedentes y marco teórico. Se hizo una recopilación de investigaciones importantes realizadas alrededor del mundo, para así tener una mejor visión del alcance de la presente tesis y los resultados que se esperan obtener. De la misma manera se describen las metodologías a utilizar, estableciendo la teoría que las sustenta y describiendo la manera de cómo utilizarlas.

Capítulo 3: Evaluación de la humedad y temperatura durante el proceso de secado de especímenes de tierra. En este capítulo se fabricaron especímenes cilíndricos de tierra los cuales fueron instrumentados con sensores de temperatura y humedad tanto al interior como al exterior de las probetas. Estas pruebas se llevaron a cabo al interior de un ambiente controlado con el fin de estudiar el proceso de secado de la tierra y de la misma manera evaluar la evolución de la resistencia a la compresión.

Capítulo 4: Validación experimental de la influencia de la temperatura y humedad en un péndulo de metal. Se describe el monitoreo continuo de un espécimen de acero con el fin de validar la herramienta de identificación automática dinámica y para estudiar la influencia de factores ambientales en la variación de las propiedades dinámicas.

Capítulo 5: Monitoreo dinámico y ambiental de muros de adobe. Se describe las pruebas de laboratorio realizadas en la construcción de tres muros de adobe para medir los parámetros dinámicos y ambientales. En estas pruebas se realizaron las etapas de caracterización de materiales, instrumentación y el monitoreo continuo y totalmente automatizado por un periodo de varios meses.

Capítulo 6: Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros. Se presentan las conclusiones y recomendaciones de la tesis, así mismo se proponen trabajos futuros que nos ayuden a realizar posteriores investigaciones en el campo del monitoreo de salud estructural de construcciones históricas y modernas.

1.5 Resultados

A partir de esta investigación se redactó la siguiente publicación que ha sido aceptada en una conferencia internacional arbitrada.

R. Delgadillo, G. Zonno, R. Boroschek, P. B. Lourenço, & R. Aguilar, (2016). Study of the environmental influence on the dynamic behaviour of adobe walls: preliminary tests in laboratory specimens. *7th International conference on experimental vibration analysis for civil engineering structures, 12-14 July 2016, San Diego, California, United States.*



Capítulo 2

Revisión de antecedentes y marco teórico

Resumen

En este capítulo se presentan conceptos y metodologías concernientes al campo del monitoreo de salud estructural que se viene desarrollando con mayor detalle en varias partes del mundo mediante el estudio de diversos casos de estudio. De la misma manera se está utilizando tecnología cada vez más sofisticada y haciendo los procesos de obtención y procesamiento de datos de manera más automatizada. Por otro lado se recopila la información de los efectos de los factores ambientales en las propiedades dinámicas de sistemas estructurales modernos e históricos. Es por este motivo la importancia de la presente Tesis ya que se tiene pocas investigaciones en construcciones antiguas y en el material tierra.

2.1 Introducción

En los últimos años se vienen utilizando técnicas innovadoras y de carácter no destructivo en el estudio de la identificación de daños estructurales basados en vibración ambiental y del monitoreo de salud estructural en construcciones modernas e históricas. En este capítulo se presentan diversos casos de estudio que demuestran que las estructuras experimentan un deterioro progresivo debido al efecto negativo que causan las condiciones ambientales (He, 2008). Sin embargo no existen muchas investigaciones en el campo del monitoreo de salud estructural de construcciones históricas de adobe ni trabajos de laboratorio que predigan las relaciones entre factores ambientales y las propiedades dinámicas. Por esta razón en este capítulo se realiza una recopilación de las investigaciones más importantes realizadas en varias partes del mundo.

2.2 Monitoreo de salud estructural

El monitoreo de salud estructural SHM (Structural Health Monitoring, por sus siglas en inglés) es una tecnología que combina la toma de datos de una estructura con el análisis de la misma y sirve para controlar la seguridad, la integridad y el rendimiento de una estructura (Doebling et al., 1996). Para lo cual se consiguen los datos a partir de una red de sensores ubicados en puntos estratégicos (sensores de aceleración, temperatura, humedad, inclinómetro, anemómetro, etc). Estos sirven para detectar la presencia y ubicación de algún daño generado como consecuencia de un sismo, evento impredecible, condiciones ambientales o por su propia vida útil al pasar los años. Esta información puede ser periódica o en tiempo real y está asociada a diversos cambios como deterioro, corrosión, humedad, cambios en las variables ambientales, etc. Así como a las propiedades físicas relacionadas a la carga, esfuerzos, desplazamientos, deformaciones, aceleraciones, agrietamiento, vibraciones y otros que sean necesarios para la evaluación operacional de la estructura. La selección de los parámetros a medir dependen de varios factores, como el tipo de estructura, el uso de la misma, los materiales de construcción, ciertas condiciones ambientales, etc. Es decir en términos generales estos factores pueden ser mecánicos, físicos o químicos.

En el campo del monitoreo de salud estructural (SHM) y la detección de daños se han venido desarrollando técnicas y métodos cada vez más modernas que involucra tanto monumentos históricos como estructuras modernas. Desde la década de los 80 se vienen utilizando técnicas de monitoreo para detectar la salud estructural de construcciones modernas (Asghari, 2009). Por ejemplo existen investigaciones del monitoreo de salud estructural para puentes desde principios de 1980 (Doebling et al., 1996) hasta la actualidad (Zhou, 2014) y presentan una recopilación de casos de estudio en diferentes países del mundo. En la Figura 2.1 se muestran dos casos de estudio de los sistemas de monitoreo de salud estructural en construcciones modernas (Magalhães, 2010) y antiguas (Ubertini, et al., 2016).

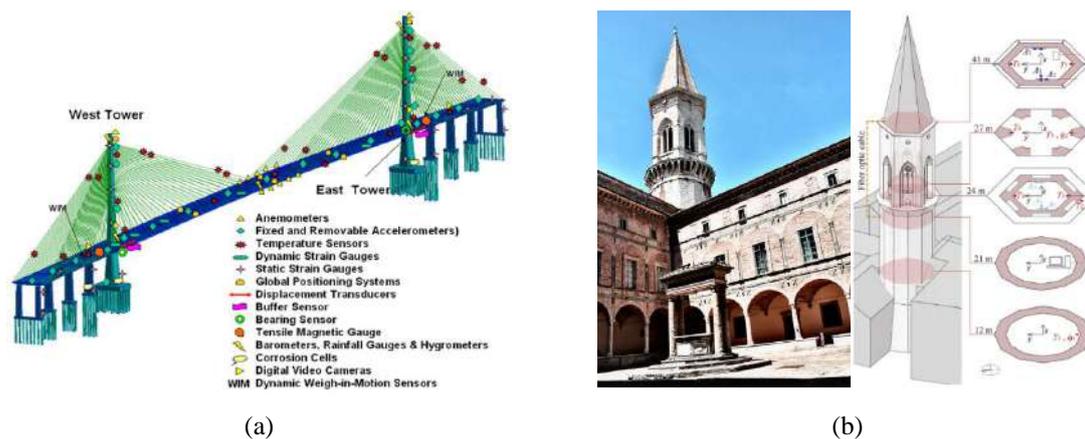


Figura 2.1 Sistema de monitoreo en estructuras modernas e históricas (a) Puente Stonecutters (Hong Kong) (b) El campanario de la Basílica de San Pietro (Italia).

De la misma forma existen ensayos experimentales de identificación modal para la evaluación estructural de construcciones históricas que tienen como finalidad estimar el comportamiento real mediante la identificación de propiedades dinámicas (Chácara, 2013). (Ramos, 2007) presentó una metodología para el monitoreo de la salud estructural y la identificación de daños basado en la vibración de señales para dos casos de estudio: La Torre del Reloj en Mogadouro y la iglesia del Monasterio de Jerónimos (Portugal).

En el caso de estructuras preexistentes como edificios, puentes, túneles o monumentos históricos no monitoreados, la falta de monitoreo puede llevar a problemas graves que se hacen evidentes hasta que la situación sea crítica y demasiado costosa. En este sentido el monitoreo estructural nos permite cuidar las estructuras a largo plazo disminuyendo costos de mantenimiento y reparación.

En la actualidad la preservación del patrimonio arquitectónico es considerada un problema fundamental en la vida cultural de las sociedades modernas, debido a que son dañados y afectados por diferentes factores (sismos, condiciones ambientales, etc). Además de resaltar el interés histórico, los monumentos contribuyen significativamente a la economía de ciudades y países por ser principales atractivos llenos de historia y arte (Ramos, 2007). Debido a esto requieren de un especial cuidado y preservación, para lo cual se debe tener en cuenta la evaluación de la condición estructural y la detección de posibles daños en una etapa temprana. Las estructuras del patrimonio arquitectónico por su peculiaridad y su compleja historia, requieren una organización de los estudios y análisis en distintos pasos, similares a los que se utilizan en medicina: evaluación, diagnóstico, terapia y rehabilitación. Por lo anterior el monitoreo de salud estructural es un proceso a largo plazo que involucra el monitoreo continuo de las características dinámicas de una estructura realizada mediante instrumentos digitales (sensores). El proceso de monitoreo de salud estructural involucra observaciones de un sistema por un largo periodo de tiempo usando continuamente muestras de las mediciones de la respuesta dinámica a partir de un arreglo de sensores (Garevski, 2013).

2.3 Efecto de los factores ambientales

El interés en la capacidad de monitorear una estructura y detectar daño en la etapa más temprana posible es un fenómeno generalizado en todas las comunidades de ingeniería civil, mecánica, aeroespacial, etc (Doebling, et al., 1996). Hasta la actualidad se ha realizado investigaciones importantes en la formulación de algoritmos de detección de daños basados en vibración. El concepto básico en el uso de la detección de daños basados en vibración es que las propiedades dinámicas, en particular las frecuencias naturales, las formas modales y el amortiguamiento son funciones de los parámetros físicos como la masa y rigidez (Ko, 2003). Los cambios en los parámetros físicos causarán cambios detectables en las propiedades de vibración. En la actualidad las investigaciones están dando énfasis en el estudio de la variabilidad de las propiedades dinámicas causadas por cambios en las condiciones ambientales y operacionales (Liu, et al., 2016). Los cambios ambientales, especialmente la temperatura, pueden causar cambios en las propiedades de vibración, como la frecuencia, formas modales, y factor de amortiguamiento, que pueden encubrir los cambios provocados por daño estructural. Es necesario un conocimiento profundo de esta variabilidad para que los cambios en la respuesta de vibración resultante de los posibles daños puedan ser eliminados. En realidad, la variación de las temperaturas afecta a las propiedades de vibración de una manera complicada. En primer lugar, la distribución de temperatura y su variación son generalmente no uniforme y dependiente del tiempo, lo que induce que los cambios de los parámetros físicos entre las diferentes partes estructurales no coinciden (Xia, et al., 2010). En segundo lugar, el módulo de elasticidad y el módulo de corte del material, que son los principales parámetros que determinan las propiedades de vibración de las estructuras, varían debido a la variación de la temperatura. En tercer lugar, las variaciones diarias o estacionales en la temperatura pueden cambiar la rigidez de las juntas de dilatación en las estructuras o soportes y así debilitar las restricciones, lo que resulta en un aparente cambio de las propiedades de vibración. Por ejemplo, la variación de frecuencias modales en puentes puede ser de 5% a 10% debido a la temperatura, que en la mayoría de los casos supera los cambios de frecuencias debido al daño o deterioro estructural (Zhou, et al., 2010).

(Cornwell, et al., 1999) examinaron la variabilidad en las propiedades modales causado por los efectos ambientales del puente de Cañon de Alamosa al Sur de Nuevo México. El puente fue instrumentado con 30 acelerómetros, 05 termómetros digitales y fue excitado por un martillo instrumentado. Se realizó un análisis de correlación entre las frecuencias de resonancia y las mediciones de temperatura, así también la temperatura media en la parte superior e inferior de la cubierta y las diferencias de temperatura entre los lados Este y Oeste del puente. La Figura 2.2a muestra las frecuencias del primer modo de vibración y la diferencia de temperatura entre el lado Este y Oeste del puente en el lado superior de la cubierta. Se obtuvo que la frecuencia del primer modo varía aproximadamente 5% durante un tiempo de monitoreo de 24 horas. A pesar de que se encontró que las diferencias de temperatura deben correlacionarse con las frecuencias, los límites de incertidumbre son todavía relativamente grandes. Para ilustrar esto se realizó un ajuste de la curva de regresión

lineal de las frecuencias del primer modo y los intervalos de predicción del 95% como se muestra en la Figura 2.2b.

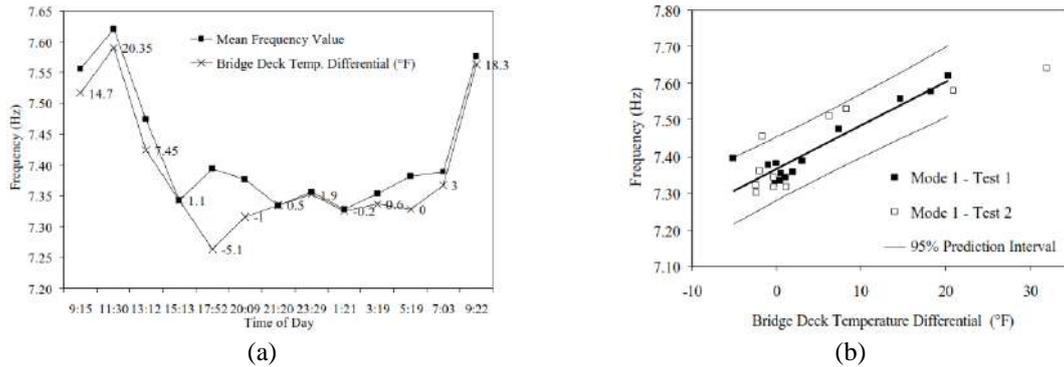


Figura 2.2 Resultados de cambios en la temperatura y propiedades dinámicas. (a) Cambio en la primera frecuencia durante 24 horas (b) Relación entre la primera frecuencia y la variación de temperatura. Adaptado de (Cornwell, et al., 1999).

Antes de recurrir a cualquier intento para identificar la presencia de daño estructural es importante evaluar y separar los efectos ambientales y cargas de la respuesta dinámica de la estructura (Ramos, 2007). Ahora es conocido que la temperatura puede cambiar el módulo de elasticidad en una relación inversa y las condiciones de borde pueden ser también dependientes de la temperatura (Yan, et al., 2005). Con el objetivo de determinar la manera en que varían las frecuencias características de una estructura frente a los efectos de las condiciones ambientales, Tamayo (2014) realizó el monitoreo permanente del edificio Torre Central ubicado en la Universidad de Chile. El sistema consistió en una red de 11 sensores de los cuales 8 fueron acelerómetros uniaxiales y 3 fueron sensores de humedad. Los registros de frecuencia fueron generados mediante la aplicación del método de identificación de Sub-Espacio Estocástico (SSI_COV) a los registros de aceleración de la estructura y cuyo análisis se reporta en (Basoalto, 2013). Los registros utilizados se analizaron en ventanas de tiempo de 15 minutos y abarcan un periodo de 2 años y 6 meses. En la Figura 2.3a se observa los registros de frecuencias dentro de los cuales la caída abrupta corresponde al efecto del terremoto del 27 de febrero de 2010 y el otro debido a que el sistema de medición estuvo inactivo. En la Figura 2.3b se grafican las frecuencias en el rango de 1 año en conjunto con la temperatura, en donde se observa claramente que la tendencia de variación estacional de las frecuencias está relacionada con la variación de temperatura. En este periodo se registraron variaciones del 6.8% para la frecuencia 1, 8.2% para la frecuencia 2 y 7.7% para la frecuencia 3.

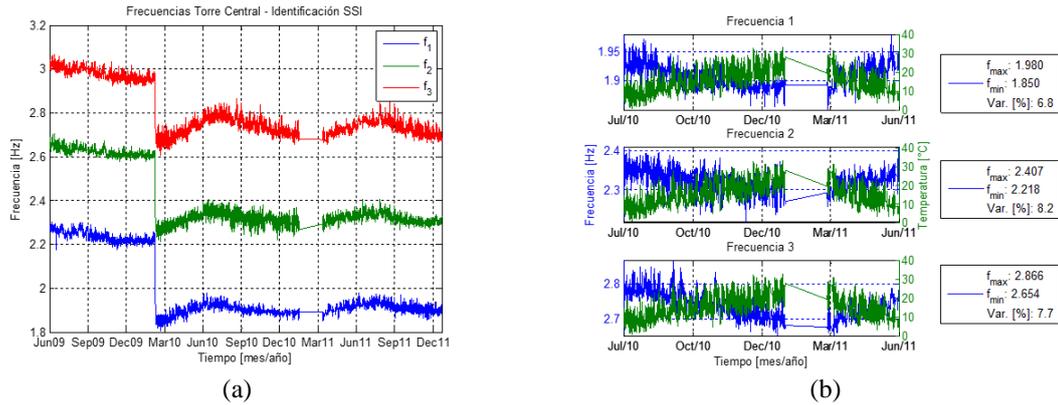


Figura 2.3 Resultados del monitoreo de frecuencia y temperatura. (a) Frecuencias de la Torre Central (b) Variación estacional de frecuencias debido a la temperatura durante 1 año de monitoreo continuo. Adaptado de (Tamayo, 2014).

Como ha señalado Kulla (2010) aunque las mediciones de temperatura son relativamente fáciles de realizar, las ubicaciones óptimas de los sensores pueden ser difíciles de determinar o de alcanzar. En la práctica se instalan un gran número de sensores ubicados en diferentes lugares, sin embargo sólo unos pocos registran información de acuerdo con su sensibilidad y factores externos que lo afectan. Por ejemplo, en un trabajo de Ko et al. (2005) se seleccionaron solo 20 mediciones de temperatura entre un conjunto de 83 instalados de forma permanente en un puente atirantado debido a que tenían mayor factor de correlación. Por otro lado se encontró la dificultad que las variables ambientales que afectan a las características de vibrar a veces no son fáciles de determinar.

Yan (2005) utilizó el Análisis de Componentes Principales (PCA) con el fin de realizar un diagnóstico de daño estructural bajo condiciones ambientales en un puente de 3 vanos construido de concreto y acero. Durante el proceso de monitoreo la estructura estuvo sujeta a variaciones de temperatura, así como a un gradiente de temperatura (ver Figura 2.4a). En la Figura 2.4b puede observar que tanto las variaciones de temperatura como los daños estructurales son responsables de los cambios de las frecuencias naturales.

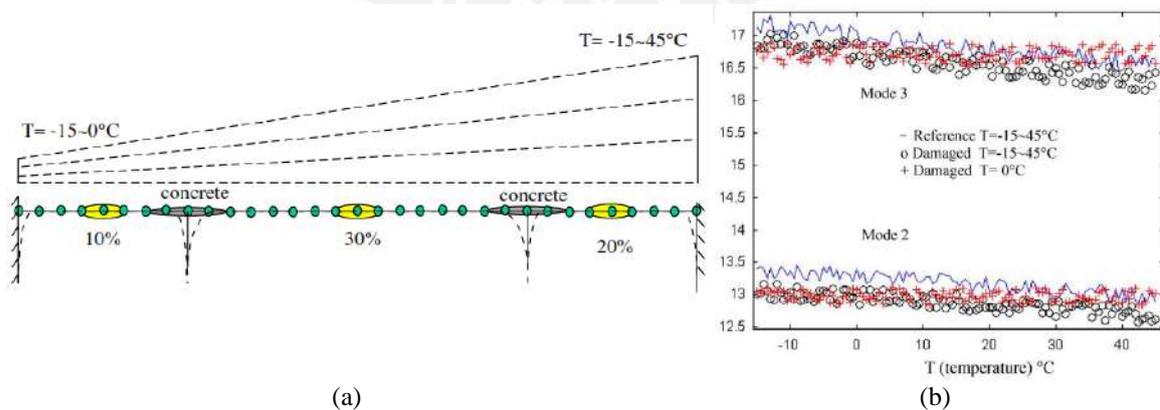


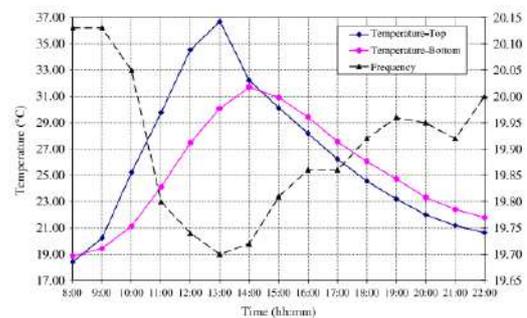
Figura 2.4 Monitoreo de frecuencia y temperatura en un puente de concreto y acero. (a) Gradiente de temperatura (b) Variación de frecuencias con la temperatura. Adaptado de (Yan, 2005).

Xia, et al. (2010) establecen la correlación entre la temperatura ambiental, las medidas en la superficie y las respuestas estructurales (frecuencias de vibración) de una losa de concreto armado (ver Figura 2.5a). La temperatura de una estructura total se distribuye de una manera no uniforme, por lo que usando solo las temperaturas del aire o de la superficie no es suficiente para obtener la relación entre las características dinámicas y la temperatura. La Figura 2.5b muestra claramente que la frecuencia de la estructura disminuye cuando la temperatura aumenta antes del mediodía, mientras que la frecuencia aumenta cuando la temperatura desciende en la tarde, según lo observado por muchos investigadores. Para relacionar las temperaturas con las frecuencias se implementó un modelo de regresión lineal múltiple que tiene la siguiente forma:

$$f = \beta_0 + \beta_1 t_1 + \dots + \beta_p t_p + \epsilon_f$$



(a)



(b)

Figura 2.5 Monitoreo de frecuencia y temperatura en una losa de concreto armado. (a) Losa de concreto armado (b) Variación de la primera frecuencia versus la temperatura. Adaptado de (Xia, et al., 2010).

En el caso de estructuras de tierra se espera que también los factores ambientales como la temperatura y la humedad puedan tener una influencia en el comportamiento dinámico. El posible efecto de la rigidez y el cambio de masa debido a la humedad y temperatura sigue siendo un reto para ser abordado por la comunidad científica implicada en este campo del conocimiento.

2.4 Estudios previos realizados en tierra

Existen construcciones antiguas hechas a base de tierra que forman parte del patrimonio arquitectónico cultural de la humanidad los cuales deben ser preservados y cuidados. Dichas construcciones en la actualidad están siendo deterioradas por distintos factores como la ocurrencia de movimientos sísmicos y otros factores ambientales los cuales ponen en riesgo su estabilidad y podrían ocasionar su desaparición. Por lo expuesto es necesario evaluar los efectos que traen consigo los factores ambientales (temperatura, humedad, presión, etc) en las propiedades dinámicas mediante técnicas modernas de monitoreo de la salud estructural.

Debido a que el daño estructural de una edificación histórica tiene consecuencias no sólo a nivel de costos o pérdidas humanas, sino también a nivel cultural y patrimonial, el estudio de la seguridad estructural de este tipo de estructuras es de vital importancia. Por lo tanto cuando se interviene una estructura histórica, la seguridad estructural que se debe cumplir va más allá de evitar fallas estructurales mayores y pérdidas de vidas humanas.

Las estructuras siempre son afectadas por muchas excitaciones las cuales son debidas a microvibraciones, vehículos, viento, etc. Estas excitaciones son consideradas como un ruido blanco (white-noise) que tienen todas las frecuencias y mediante el uso de las relaciones entre la respuesta y la excitación se puede determinar las características dinámicas de la estructura. Bajo este concepto Bui, et al. (2011) realizaron mediciones dinámicas de vibración in situ mediante sensores de velocidad triaxial en cuatro estructuras de tierra ubicadas en la región de Ródano en los Alpes de Francia. De los cuales se presenta el Castillo Lavort (ver Figura 2.6a) el cual fue instrumentado con 4 sensores de velocidad. En esta investigación se usó una técnica reciente para el análisis modal, conocida como FDD (Frequency Domain Decomposition) y se obtuvo los primeros picos de 4.1 Hz y 4.7 Hz (ver Figura 2.6b).

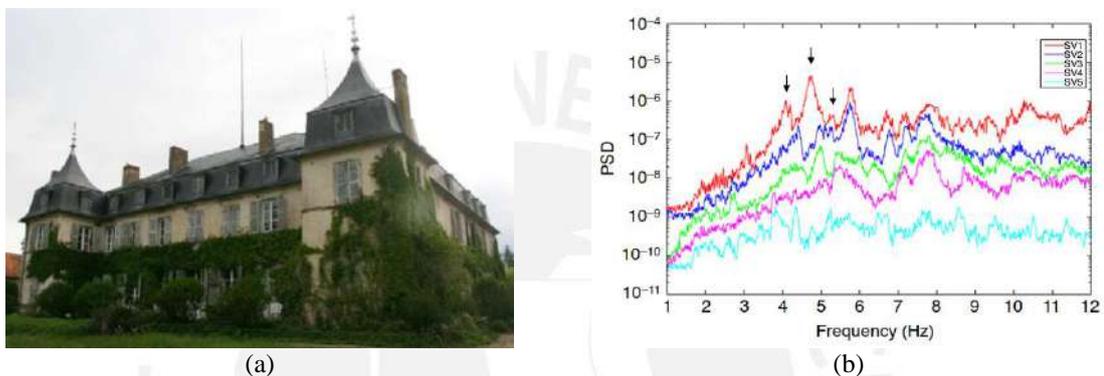


Figura 2.6 Estudio de las características dinámicas de tierra apisonada. (a) Castillo de Lavort (Francia) (b) Frecuencias de vibración. Adaptado de (Bui et al., 2005).

Ubertini, et al. (2016) realizaron un monitoreo continuo por más de nueve meses de un monumento de mampostería esbelta conocida como el campanario de la Basílica de San Pietro en Italia, con el fin de conocer los efectos de los cambios de temperatura y humedad en las frecuencias naturales de vibración. Se investigaron en detalle las correlaciones entre las frecuencias naturales y los parámetros ambientales para evaluar las capacidades predictivas de modelos lineales regresivos, para lo cual se analizaron datos obtenidos mediante sensores ambientales y acelerómetros. Los resultados han demostrado que las variaciones de temperatura pueden producir cambios significativos en las frecuencias naturales, hasta $16\text{mHz}/^{\circ}\text{C}$, mientras que los efectos de la humedad del aire son relativamente marginales. En la Figura 2.7 se muestran las variaciones de las frecuencias naturales por efectos de los factores ambientales (temperatura). Los resultados demuestran que las regresiones lineales multiparamétricas son efectivas para este propósito, ya que las correlaciones estadísticas entre las frecuencias y la temperatura son notablemente lineales.

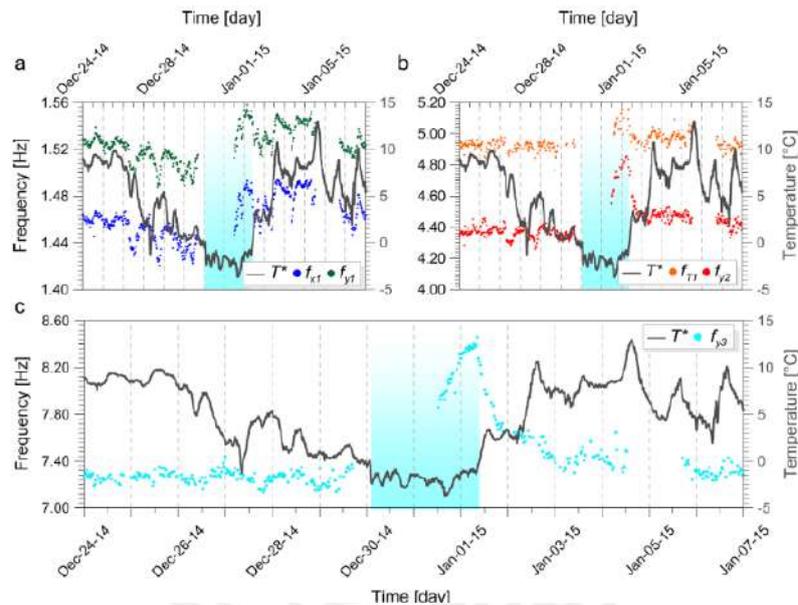


Figura 2.7 Historial temporal de las frecuencias naturales y los datos de temperatura. Adaptado de (Ubertini, et al., 2016).

2.5 Métodos de correlación entre propiedades dinámicas y factores ambientales

La mayoría de los estudios de la literatura indican que las frecuencias naturales de vibración varían debido al efecto de diversos factores ambientales, por ejemplo las frecuencias disminuyen a medida que aumenta la temperatura. Estos resultados se deducen directamente de datos simulados o datos de medición los cuales son dependientes del tipo de estructura, del material y del tiempo de monitoreo. Por ejemplo en el caso de puentes, los cambios de frecuencias naturales por unidad de temperatura son diferentes, incluso utilizando los datos obtenidos de puentes idénticos en diferentes periodos de tiempo. Por lo expuesto anteriormente se necesita estudiar y entender diversas metodologías estadísticas para el análisis y correlación de grandes cantidades de datos obtenidos en meses e inclusive años. El análisis de regresión puede revelar cuál es el grado en que las propiedades de vibración se ven afectadas por las variaciones de los factores ambientales (Guang-Dong and Ting-Hua, 2014). Para tal motivo se desarrollan dos tipos de regresiones: modelo dinámico lineal de autoregresión con variable exógena (ARX) y regresión multiparamétrica lineal (MLRM).

2.5.1 Regresión multiparamétrica lineal (MLRM)

La regresión multiparamétrica lineal es una técnica estadística muy simple que se puede utilizar para analizar la relación entre una o varias variables dependientes a partir de otras independientes (predictoras). En la presente investigación el análisis de regresión se desarrolla a partir de un conjunto de variables dependientes (frecuencias naturales) y un conjunto de variables independientes (factores ambientales: temperatura y humedad). El modelo lineal supone que las propiedades de vibración cambian con la temperatura de manera lineal. Los coeficientes del modelo lineal son generalmente estimados por métodos de regresión. Este modelo es consistente con la formulación teórica simplificada y es muy

fácil de implementarlo. La respuesta estimada y la forma general se muestra como una función lineal en la ecuación 2.1 (Kottegoda, 2008).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_{p-1} x_{p-1} + \varepsilon \quad (2.1)$$

Donde:

Y = variable de respuesta

x = variables independientes o predictoras

β = coeficientes de regresión o constantes

ε = error asociado a la observación

De la misma manera que en el modelo de regresión simple, la linealidad de un modelo de regresión múltiple se define con respecto a los coeficientes de regresión y se supone que las variables explicativas son conocidas y están libres de errores, pero la variable de respuesta es tratada como una variable aleatoria.

Matricialmente el modelo de regresión múltiple se escribe como:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\beta + \varepsilon \quad (2.2)$$

Los valores de β se determinan utilizando el método de los mínimos cuadrados de manera tal que minimicen la suma de los cuadrados de los errores. Dado que los valores para β encontrados con el método de los mínimos cuadrados son estimaciones, éstos se denominan $\hat{\beta}$.

Por lo tanto, se definen las estimaciones de $\hat{\beta}$ de la siguiente manera:

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (2.3)$$

Estas estimaciones se obtienen utilizando distintos periodos de datos para determinadas variables ambientales. Estas variables se definen en función de su correlación con las frecuencias características de la estructura analizada, además de la correlación que existe entre variables ambientales (Tamayo, 2014).

2.5.2 Modelo autoregresivo con variable exógena (ARX)

El modelo dinámico ARX puede utilizarse con el fin de calcular valores predictivos considerando valores previos de las variables dependientes. Los modelos autoregresivos tienen la ventaja de ser generados rápidamente, ya que se obtienen experimentalmente al establecer las relaciones de entrada-salida del sistema a través de técnicas de identificación de sistemas (Ljung, 1999). El modelo ARX comprende una salida Auto-Regresiva que se refiere al uso de valores conocidos de la variable que se está modelando, mientras que una entrada exógena corresponde a las variables utilizadas como predictores. Por lo tanto, las variables de entrada del modelo corresponden a los efectos ambientales causados por la variación de estas propiedades, mientras que las variables de salida corresponden a propiedades dinámicas como: frecuencias naturales, amortiguamiento y la forma modal.

En el caso en el que se considera sólo una entrada y una salida (*SISO: single input single output*, salida simple de una sola entrada), la forma general de un modelo ARX se obtiene como:

$$y_t + a_1 \cdot y_{t-1} + \dots - a_{n_a} \cdot y_{t-n_a} = b_1 \cdot u_{t-n_t} + \dots + b_{n_b} \cdot u_{t-n_t-n_b+1} + \varepsilon_t \quad (2.4)$$

Donde:

y_t = variable dependiente (output) en el instante t

u_t = valor del predictor (input)

a_t = parámetro del modelo que se estima mediante mínimos cuadrados

b_t = parámetro del modelo que se estima mediante mínimos cuadrados

ε_t = error que modela las perturbaciones que actúan en el proceso, es decir es el ruido blanco asociado con la variable de salida

El modelo ARX se caracteriza por la presencia de tres coeficientes: n_a es el número de pasos de tiempo de la salida en el pasado, n_b es el número de pasos de tiempo de la entrada en el pasado y n_k es el retardo de la entrada u_t con respecto a la salida y_t .

Para establecer la estructura de un modelo ARX se requiere determinar los coeficientes $a_{11}, a_{12}, a_{ny1}, \dots, a_{ny2}, \dots, a_{nyny}$ y $b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1nu}, \dots, b_{ny1}, b_{ny2}, \dots, b_{nyny}$, así como el orden del modelo dado por los valores de los parámetros n_a, n_b y n_k a partir de la información de las variables de entrada y salida que permitan obtener el mejor ajuste entre la predicción del modelo y la variable de salida medida (López-Cruz, et al., 2007).

Elección del criterio de ajuste

Para determinar los valores óptimos de n_a, n_b y n_k se utilizan el error de predicción final de Akaike (FPE) y el criterio de información de Akaike (AIC). Estos criterios utilizan una función de pérdida mínima en combinación con un número mínimo de parámetros estimados y se muestran en las ecuaciones 2.5 y 2.6 (Ljung, 1999).

$$FPE = \left(\frac{1 + \frac{d}{N}}{1 - \frac{d}{N}} \right) V \quad (2.5)$$

$$AIC = \log \left(V \left(1 + 2 \frac{d}{N} \right) \right) \quad (2.6)$$

Donde:

V = función de pérdida, un ajuste cuadrático de la estructura

d = número de parámetros estimados

N = número de datos

Capítulo 3

Evaluación de la humedad y temperatura durante el proceso de secado de especímenes de tierra

Resumen

En este capítulo se presenta la elaboración de especímenes cilíndricos de tierra para el monitoreo continuo de factores ambientales (temperatura y humedad) al interior de un ambiente controlado. El objetivo fue evaluar como varían los factores ambientales internos y externos durante el proceso de secado y estudiar la evolución de la resistencia a lo largo del tiempo. Para lo cual primero se realizó la caracterización física del suelo mediante ensayos de mecánica de suelos realizados en el laboratorio de Mecánica de suelos de la PUCP. Luego se desarrolló un proceso de fabricación de especímenes de tierra mediante una serie de procedimientos ordenados y sistematizados los cuales dieron buenos resultados. El monitoreo continuo se llevó a cabo por un periodo de diez meses y para tal fin se diseñó el sistema de monitoreo ambiental continuo utilizando sensores de temperatura y humedad. De la misma manera se fueron realizando ensayos de compresión uniaxial de los especímenes de tierra a diferentes edades. Los resultados obtenidos demuestran como varían los factores ambientales y la resistencia a la compresión de los especímenes de tierra al interior de un ambiente controlado obteniendo curvas de aproximación.

3.1 Introducción

Se calcula que del 30% al 40% de la población mundial vive actualmente en estructuras construidas de tierra debido a que es el material más accesible al hombre para construir (Miccoli et al., 2014). En el caso del Perú el uso de este material se prolongó a lo largo de nuestra historia fundamentalmente por ser de fácil acceso y por permitir crear ambientes con condiciones de aislamiento acústico y térmico. En la actualidad se están desarrollando cada vez más investigaciones que involucren la tierra como material de construcción y de la misma manera en diferentes procesos constructivos como el tapial, adobe, etc. Estas investigaciones se están desarrollando en varios campos de la ingeniería como por ejemplo evaluar la parte sísmica, los parámetros mecánicos, las propiedades térmicas, etc. Sin embargo existe un campo en el cual aún no se tienen investigaciones recientes y este es en la colocación de sistemas de monitoreo para evaluar el comportamiento de la tierra producto de diversos factores externos. Debido a la gran importancia que se tiene en el estudio del material tierra y tratándose de un tema nuevo e innovador se propone hacer diversos ensayos para evaluar el tiempo de secado en especímenes de tierra colocados al interior de un ambiente controlado.

3.2 Caracterización del material y propiedades físicas

Dentro de los ensayos preliminares se hicieron ensayos de mecánica de suelos en el laboratorio de suelos de la PUCP los cuales sirvieron para caracterizar el tipo de material de suelo. Primeramente se obtuvieron tres muestras de suelo traídas del norte de Lima, específicamente del distrito de Carabayllo ya que estos suelos son los comúnmente utilizados en la construcción de viviendas de adobe. Los ensayos de suelo fueron los siguientes: análisis granulométrico y límites de consistencia siguiendo las recomendaciones de las normas (ASTM D422-63, 2007) y (ASTM D4318-10, 2010) respectivamente.

3.2.1 Ensayo de límite líquido y límite plástico (ASTM D-4318)

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio normalizados que permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico y es posible clasificar el suelo mediante la Clasificación Unificada de Suelos (Unified Soil Classification System, SUCS). Para obtener estos límites se requiere remoldear (manipular) la muestra de suelo destruyendo su estructura original y por ello una descripción del suelo en sus condiciones naturales es absolutamente necesaria y complementaria. Para realizar los límites de Atterberg se trabaja con todo el material menor que la malla #40 (0.42 mm). Esto quiere decir que no solo se trabaja con la parte fina del suelo (< malla #200), sino que se incluye igualmente la fracción de arena fina. En la Figura 3.1 se muestra el procedimiento del ensayo de Límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico).



Figura 3.1 Ensayos de límites de Atterberg (a) Preparación de muestras. (b) Golpes con la cuchara de Casagrande. (c) Peso de muestra para el límite líquido. (d) Peso de la muestra para el límite plástico.

Los datos de las muestras de laboratorio para obtener el límite líquido se muestran en la Tabla 3.1 y en la Figura 3.2 y de la misma manera para el límite plástico se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1 Determinación del límite líquido

Ensayo N°	1	2	3	4
Cápsula N°	12	16	13	24
Peso de cápsula	21.33	22.58	29.63	29.12
Peso cáp.+ suelo húmedo	30.40	31.09	38.32	39.38
Peso cáp.+ suelo seco	28.14	28.98	36.27	37.02
Humedad, ω (%)	33.19	32.97	30.87	29.87
Número de golpes, N	15	22	26	31

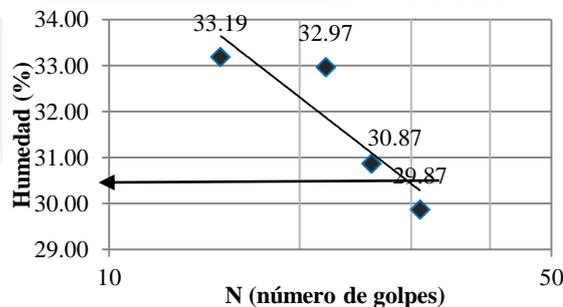


Figura 3.2 Número de golpes versus contenido de Humedad.

Tabla 3.2 Determinación del límite plástico

Ensayo N°	1	2
Cápsula N°	1	55
Peso de cápsula (gramos)	14.15	6.23
Peso cáp.+suelo húmedo (gramos)	20.79	13.25
Peso cáp.+suelo seco (gramos)	19.77	12.28
Humedad, ω (%)	18.15	16.03
Promedio de humedades (LP) %		17.09
Límite Plástico		17

Los resultados del límite líquido, plástico e índice de plasticidad se muestran en la Tabla 3.3.

Límite Líquido	32
Límite Plástico	17
Índice de plasticidad	14

3.2.2 Ensayo de análisis granulométrico (ASTM D-422)

El análisis granulométrico de una muestra de suelo consiste en determinar la proporción relativa en peso de los diferentes tamaños de granos definidos por las aberturas de las mallas las cuales son normalizadas y numeradas. Debido a las limitaciones del método su uso se ha restringido a partículas mayores que 0.074 mm (malla #200) y al material menor que esta malla se le aplica el método del hidrómetro o también conocido como sedimentación. La Figura 3.3 muestra el procedimiento del ensayo de granulometría por el método del tamizado.



Figura 3.3 Ensayos de granulometría, método del tamizado (a) Muestras que pasan las diferentes mallas. (b) Colección de tamices. (c) Sarandeo de las partículas. (d) Peso de las partículas retenidas en los tamices.

La Figura 3.4 muestra el procedimiento del ensayo de granulometría por el método del hidrómetro y cuyos resultados sirven para completar la curva granulométrica.



Figura 3.4 Ensayos de granulometría, método del hidrómetro (a) Peso de la muestra. (b) Materiales para el batido de la mezcla. (c) Agitación de la muestra. (d) Proceso de sedimentación en diferentes horas.

Para realizar estos ensayos se tuvieron 3 muestras del mismo material a los que se le hicieron el análisis granulométrico por tamizado y por sedimentación (Ver Anexos del capítulo 3) y como resultado final en la Figura 3.5 se muestra las curvas granulométricas. Estas curvas nos permiten clasificar el tipo de suelo en base a los límites de Atterberg y la distribución granulométrica del suelo. En conclusión nuestras muestras de suelo se clasifican como Arcilla de baja plasticidad (CL).

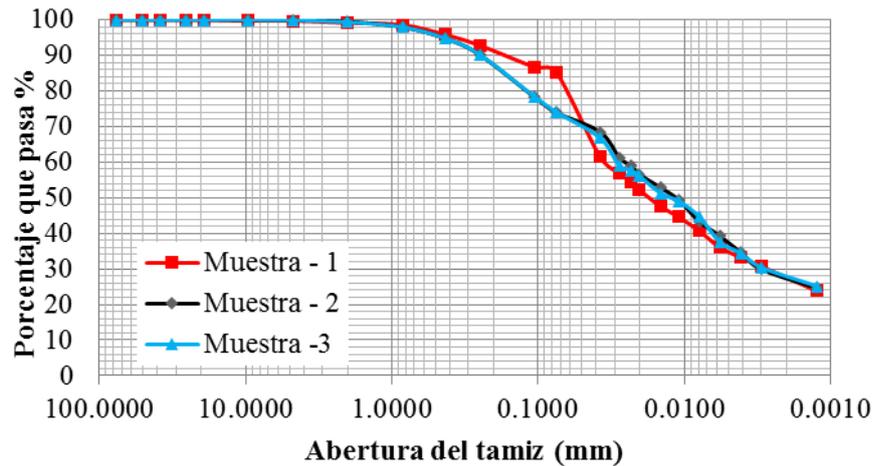


Figura 3.5 Curva granulométrica para las 3 muestras.

3.3 Caracterización mecánica de especímenes de tierra

Se determinaron las características de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de tierra de dimensiones 14cm de altura y 7cm de diámetro los cuales se fabricaron con el suelo estudiado en la sección 3.2. Por tal motivo se desarrolló una metodología para un adecuado proceso de fabricación de los especímenes los cuales fueron colocados al interior de un ambiente controlado y se obtuvo la evolución de la resistencia a la compresión.

3.3.1 Descripción de la prensa mecánica

La máquina que se muestra en la Figura 3.6 es conocida como prensa mecánica y es utilizada para la fabricación de especímenes cilíndricos de tierra. De la Figura 3.6b a 3.6e se describe cada una de las partes que la conforman.

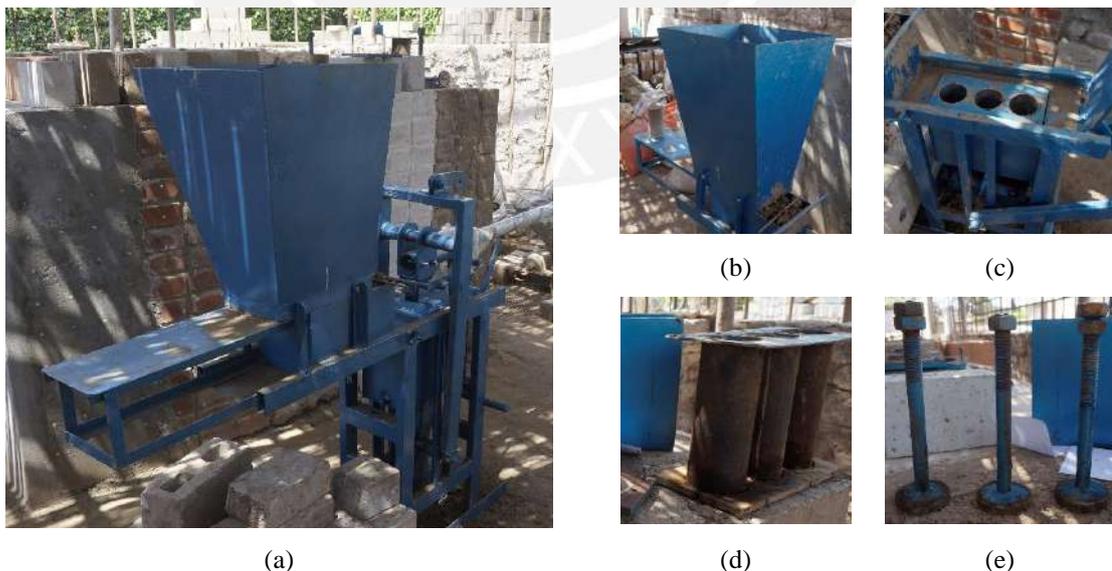


Figura 3.6 Descripción de la máquina para fabricación de probetas (a) Prensa mecánica (b) Tolva de la máquina (c) Caja de fabricación de probetas (máximo 3 probetas) (d) Tubos metálicos en donde se coloca el material de suelo (e) Pistones mecánicos.

3.3.2 Proceso de fabricación de especímenes de tierra

El proceso que se desarrolló para la elaboración de especímenes de tierra se muestra en la Figura 3.7 y se consideraron los siguientes pasos:

- Triturado del suelo: El suelo que se utilizó para fabricar los especímenes de tierra contiene partículas agrupadas en diferentes tamaños formadas durante el proceso de secado. De las cuales las partículas grandes de suelo se trituraron haciendo uso de un martillo hasta alcanzar un tamaño pequeño y constante, esto con la finalidad de tener un material uniforme (Figura 3.7a).
- Tamizado: Enseguida se tuvo que tamizar por la malla #10 y obtener partículas del mismo tamaño (Figura 3.7b).
- Mezclado con agua: Se agregó una cantidad de agua (640ml) en función al peso de la tierra (4kg) lo cual equivale a una humedad natural aproximadamente de 18%. Enseguida se realizó un mezclado manual procurando uniformizar la cantidad de agua en toda la muestra de tal forma de alcanzar una humedad aparentemente constante, la cual se podía identificar por el color de la muestra (Figura 3.7c).
- Colocación y compactación manual: En las paredes de los tubos de la prensa se colocó desmoldante para asegurar que las paredes del espécimen sean uniformes y facilitar su extracción de la máquina, de esta manera se evita el pegado en los tubos metálicos. (Figura 3.7d).
- Colocación de los sensores de temperatura y humedad: Se colocó la muestra de suelo en pequeñas capas de 3 cm aproximadamente, para inmediatamente acomodar las partículas y realizar la compactación con ayuda de un tubo de fierro. En seguida se coloca 1 sensor de temperatura y 1 sensor de humedad para cada espécimen construido (Figura 3.7e).
- Expulsión mecánica: La máquina de fabricación de los especímenes cuenta con una palanca, la cual permite aplicar una carga vertical sobre las probetas hasta llegar a una altura máxima de 14 cm. La carga vertical se realiza para compactar los especímenes, darles consistencia y uniformizar la altura de las probetas (Figura 3.7f).
- Enrazado de las probetas: Una vez expulsado los especímenes se realizó el enrazado de la parte excedente de suelo de cada una de las probetas utilizando una cuchilla. Nota: Se presentaron algunos problemas en la expulsión de las probetas, ya que la fuerza de fricción entre los especímenes y la máquina fue muy grande, sin embargo se llegó a obtener probetas consistentes (Figura 3.7g).
- Monitoreo dentro de un ambiente controlado: Los especímenes de tierra se colocan en un ambiente controlado (caja de tecnopor) para realizar el monitoreo continuo de la temperatura y humedad (interna y ambiental). De la misma manera se elaboraron 16 probetas para realizar ensayos a compresión a edades diferentes. (Figura 3.7h).



Figura 3.7 Etapas para la fabricación de especímenes de tierra (a) Trituración (b) Tamizado (c) Mezclado con agua (d) Compactación (e) Colocación de sensores (f) Expulsión de probetas (g) Enrazado (h) Monitoreo continuo.

3.3.3 Ensayos de compresión uniaxial

De acuerdo a las normas para realizar ensayos a compresión en concreto (ASTM C469, 2014) y en suelos (ASTM D2166-06, 2006), se recomienda tener una esbeltez cercana a 2 de la relación altura/diámetro ya que se ha encontrado una buena distribución uniforme de esfuerzos. Es por este motivo que se han fabricado 16 especímenes de tierra con estas características (altura de 14cm y diámetro de 7cm) los cuales estuvieron al interior de un ambiente controlado y se fueron rompiendo uno por uno para estudiar el comportamiento de secado. Las probetas ensayadas estuvieron por varios meses al interior de un ambiente controlado (caja de tecnopor) para de esta manera estudiar la evolución de la resistencia a la compresión a distintas edades. En la Figura 3.8 se muestran los especímenes de tierra el día de la fabricación los cuales serán sometidos al ensayo de compresión.



Figura 3.8 Especímenes de tierra el día de la fabricación.

Para realizar los ensayos de compresión se utilizó una maquina universal de carga modelo Zwick/Roell Z050 la cual aplica una carga por medio de desplazamiento a una velocidad constante que varía entre 0.0005 y 600 mm/min y posee una precisión del 1% de la velocidad. En la Figura 3.9 se muestra la máquina de carga utilizada y el espécimen de tierra sometido

a compresión simple. En los ensayos a compresión de los especímenes de tierra la aplicación de la carga fue controlada por desplazamiento debido a que la aplicación de carga controlada por fuerza genera una falla explosiva. La carga es registrada por medio de una celda de carga con capacidad de 50KN y con una precisión en la medición de 1N y la velocidad de aplicación de esta carga fue de 0.5mm/min.



Figura 3.9 Maquina universal de carga modelo Swick/Roell Z050 para realizar los ensayos a compresión de especímenes de tierra.

3.3.4 Resultados y discusión

De las pruebas de compresión simple se obtuvieron las fuerzas máximas que permiten comprimir los especímenes de tierra y luego se calculó la resistencia a la compresión rompiendo cada probeta a edades diferentes. La Figura 3.10 muestra las grietas generadas y las fallas típicas de los especímenes ensayados y se aprecia que a edades diferentes la probeta es más resistente ya que gracias al proceso de secado va adquiriendo resistencia.



Figura 3.10 Probetas ensayadas a compresión

En la Figura 3.11 se muestra la evolución de la resistencia a compresión de los especímenes de tierra durante un periodo de cuatro meses a partir de abril hasta agosto del 2016. De estos resultados se muestra un aumento progresivo de la resistencia a compresión el cual está influenciado con la disminución del contenido de humedad que tiene cada probeta. Los datos de compresión se ajustan perfectamente a una curva exponencial con un coeficiente de determinación R^2 muy alto de 0.97 el cual nos indica que existe un buen ajuste.

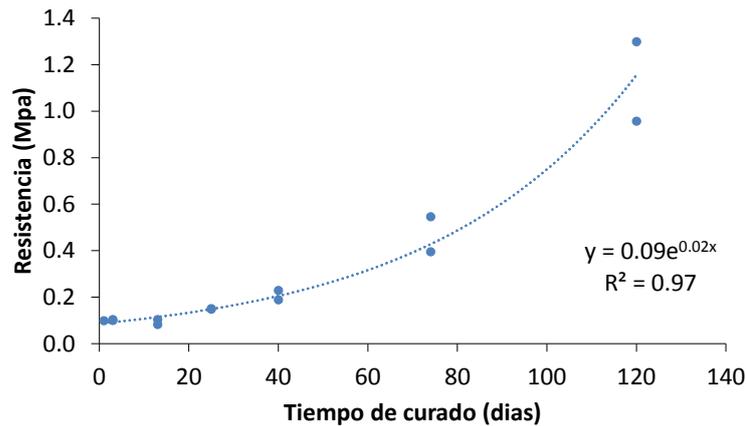


Figura 3.11 Evolución de la resistencia a la compresión de los especímenes de tierra.

3.4 Ensayos de monitoreo continuo de temperatura y humedad

Los ensayos de monitoreo continuo fueron llevados a cabo con el fin de evaluar los parámetros ambientales de especímenes de tierra al interior de un ambiente controlado. Para tal fin a continuación se describen los sensores y equipos utilizados.

3.4.1 Sensor de temperatura y humedad interna

Sensor de temperatura LM35

Para realizar las mediciones de temperatura al interior de las probetas se han utilizado sensores analógicos integrados de bajo costo, gran rango de medida y alta precisión, el modelo que se usa es el LM-35 (LM-35, 2016) mostrado en la Figura 3.12. El sensor LM-35 consta de 3 pines (+Vs = alimentación, Vout = Datos y GND = tierra) y tiene un encapsulado TO-92 (*transistor outline package case style 92*) de plástico. Produce una tensión de salida (voltaje) que varía en forma proporcionalmente lineal a la temperatura obtenida en grados centígrados. El rango de evaluación del sensor de temperatura está entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Según las especificaciones técnicas para usarlo en mediciones de temperatura negativas, debe tener alimentación simétrica (+Vs - Vs) y una resistencia externa adicional.

Las especificaciones técnicas más importantes son:

- Precisión de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Tensión de alimentación 4 – 30V.
- Calibrado directamente en grados centígrados.
- Factor de escala de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$.
- Rango de temperaturas de operación general $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (+Vs - Vs).
- Rango de temperaturas de operación básica $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (+Vs GND).

La señal que es recibida en mili voltios del sensor LM-35 se convierte en grados centígrados mediante una fórmula lineal, la cual se muestra en la Ecuación 3.1.

El contenido de agua en un determinado suelo se obtiene mediante dos métodos: directos e indirectos. Para medir de forma directa el contenido de agua se emplean métodos gravimétricos y volumétricos para lo cual se obtiene una muestra de suelo de volumen conocido, luego se pesan, secan y pesan de nuevo, de esta manera por una simple relación se obtiene el porcentaje de contenido de agua en el suelo. Los sensores de humedad del suelo miden de forma indirecta el contenido de agua volumétrica por lo que son medidas del suelo in situ.

Los sensores de humedad del suelo miden la propiedad del suelo que es la permitividad dieléctrica (ϵ) que consiste en la habilidad que tiene el suelo para soportar una carga eléctrica y como la permitividad cambia de forma predecible entonces es posible medirla. La teoría dieléctrica menciona que en un medio heterogéneo la fracción de volumen de cualquier componente está relacionada con la permitividad total y si cambiamos el volumen de cualquier componente cambia el valor de esta permitividad.

En la Tabla 3.4 aparecen valores de permitividad de diferentes materiales que son componentes de cualquier suelo. En el caso del agua a causa de su elevada permitividad cualquier cambio en su volumen es sensible de ser cuantificado y esta es la ventaja que emplean los sensores de humedad para medir el contenido de agua del suelo.

Tabla 3.4 Valores de permitividad dieléctrica de algunos materiales.

Material	Permitividad dieléctrica (ϵ)
Aire	1
Suelos minerales	3 – 7
Materia orgánica	2 – 5
Hielo	5
Agua	80

El suelo está compuesto por aire, materiales orgánicos, minerales y agua y la combinación de estos en diferentes volúmenes da lugar a una serie de permitividades dieléctricas que va en el caso de suelo desde 3, 4 hasta 40 y para el agua pura hasta 80. Por lo tanto cualquier cambio en estas proporciones da lugar a diferentes permitividades los cuales se muestran en la Figura 3.14.

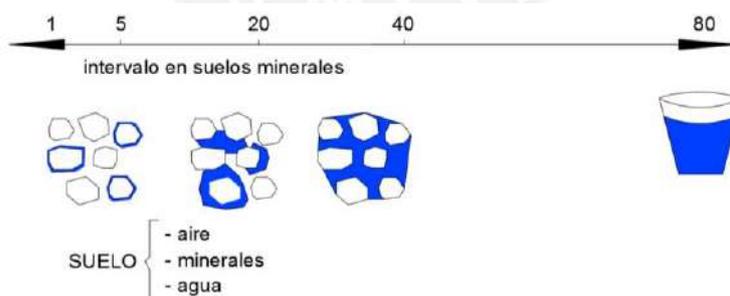


Figura 3.14 Permitividades “ ϵ ” de diferentes materiales.

La exactitud de las medidas de la permitividad se ve afectada por:

- La conductividad eléctrica (CE) o la presencia de sales. Afectan a la capacidad del sensor para separar la permitividad del suelo (ϵ) de su conductancia. Es decir a valores de CE muy elevada el sensor no es capaz de distinguirlas, en los suelos que

son salinos se recomienda emplear sensores que trabajan a frecuencia elevadas para que estas lecturas no se vean afectadas por la CE.

- La temperatura. A nivel electrónico los sensores no están afectados por la temperatura, es la permitividad del agua (ϵ_a) la que depende de la temperatura y la CE de la solución del suelo también es función de la temperatura, en este caso tiene una correlación positiva.
- La variabilidad entre los sensores. Todos los sensores deben proporcionar la misma lectura, es decir la habilidad de intercambiar sensores sin efecto en la exactitud del sensor (interoperabilidad).

Para calibrar los sensores de humedad FC-28 se realizó una serie de ensayos de laboratorio comparando los resultados que se obtuvieron al evaluar el contenido de humedad en diferentes muestras de suelo con diferentes humedades. Teniendo como máximo contenido de humedad al obtenido con el límite líquido el cual nos dio 31% para el tipo de suelo analizado. Se utilizó 743.73gr de suelo para cada muestra y se le adicionó diferentes cantidades de agua para obtener diversos contenidos de humedad. Todas las muestras de suelo se dejaron reposar por 1 día, cada una estuvo al interior de una bolsa hermética la cual garantizaba que no se pierda agua. En la Figura 3.15 se observan las seis muestras con diferente contenido de humedad:



Figura 3.15 Muestras con diferente contenido de humedad (a) 0%, (b) 6%, (c) 18% (d) 24% (e) 30%.

Al día siguiente de reposado las muestras se procedieron a realizar las mediciones puntuales con el sensor de humedad FC-28, para cada muestra se realizaron tres lecturas (dos a los extremos y una al centro). En la Figura 3.16 se muestra las mediciones puntuales.



Figura 3.16 Mediciones de humedad (a) Sistema de adquisición de datos (b) Obtención de voltajes.

Para calibrar los sensores de humedad FC-28 se hizo un ajuste lineal calculando el coeficiente de determinación el cual tiene muy buena aproximación para la humedad volumétrica $R^2 = 0.94$. En la Figura 3.17 se muestra la correlación que existe entre las mediciones con el sensor de humedad y aquellas obtenidas por el procedimiento tradicional en laboratorio.

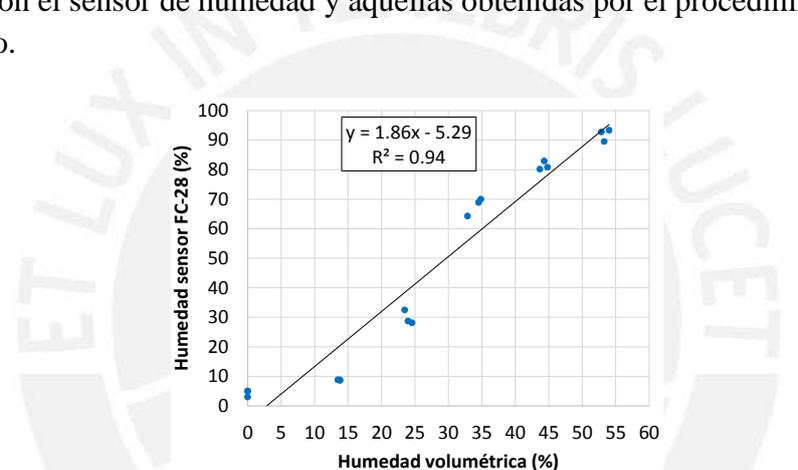


Figura 3.17 Correlación entre el contenido de humedad volumétrico y la obtenida con el sensor FC-28.

La señal que es recibida en mili voltios del sensor FC-28 se convierte en porcentajes de humedad mediante una fórmula lineal, la cual se muestra en la Ecuación 3.2. En el eje de abscisas se encuentre la salida en Voltaje del sensor (V) y en el eje de ordenadas el valor de la humedad relativa en porcentaje (HR%). Los puntos máximos que se conocen son (0mV, 100% HR) y (4080mV, 0% HR).

$$Pendiente: m = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = \frac{0 - 100}{4080 - 0} = -0.0245$$

Ecuación de la recta:

$$y = y_0 + m(x - x_0)$$

Por lo tanto:

$$HR\% = 100 - 0.0245mv... \text{ En mili voltios}$$

$$HR\% = 100 - 24.509V... \text{ En voltios}$$

.....Ecuación 3.2

3.4.2 Sensor ambiental

Para medir la temperatura y humedad ambiental se usaron sensores Tipo HOBO UX100-011 (ONSET, 2015) distribuidos por MicroDAQ y fabricados en USA los cuales se muestran en la Figura 3.18. El registrador de datos HOBO Temp/RH graba registros de temperatura y humedad relativa (a menos de 2.5% de precisión) al interior y exterior de diferentes ambientes ya que poseen sensores integrados. Usando este tipo de sensores se puede configurar fácilmente el intervalo de tiempo de medición programando alarmas de acuerdo a la necesidad de la medición. Este registrador de datos también puede calcular los mínimos, máximos, promedio y desviación estándar. De la misma manera posee una pantalla LCD incorporada para monitorear la temperatura actual, la humedad relativa, el estado del registro, el uso de la batería y el consumo de memoria en tiempo real.

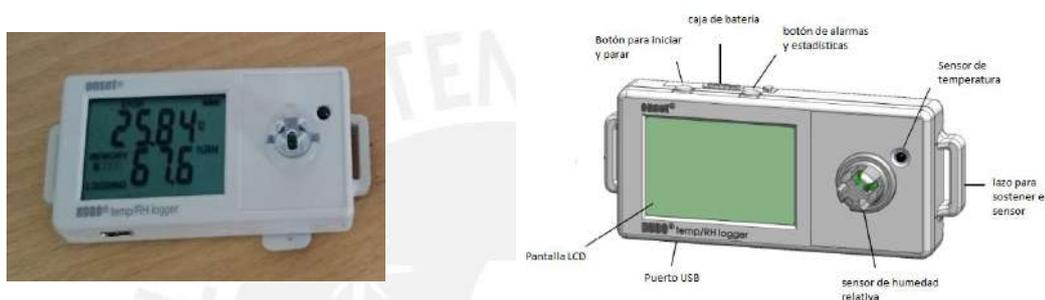


Figura 3.18 Sensor integrado de temperatura y humedad ambiental.

Las especificaciones técnicas más importantes son:

a) Sensor de temperatura

- Rango de medición $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-4\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $158\text{ }^{\circ}\text{F}$).
- Precisión de $\pm 0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ desde $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.38\text{ }^{\circ}\text{F}$ desde $32\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $122\text{ }^{\circ}\text{F}$).
- Resolución $0.024\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.04\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $77\text{ }^{\circ}\text{F}$).
- Tiempo de respuesta: 4 minutos en el aire en movimiento 1 m/s (2.2 mph).
- Desviación: $< 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.18\text{ }^{\circ}\text{F}$) por un año.

b) Sensor de humedad relativa

- Rango de medición 1% a 95% (sin condensación).
- Precisión de $\pm 2.5\%$ desde 10% a 90% típico para un máximo de $\pm 3.5\%$ incluyendo histéresis.
- Resolución 0.05% a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($77\text{ }^{\circ}\text{F}$).
- Tiempo de respuesta: 11 segundos para 90% en un flujo de aire de 1 m/s (2.2 mph).
- Desviación: $< 1\%$ por un año.

c) Adquisidor

- Rango de operación. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; 0 a 95% de humedad relativa. Lanzamiento / lectura: $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($32\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $122\text{ }^{\circ}\text{F}$) por la especificación del USB.
- Frecuencia de registro: 1 segundo por 18 horas, 12 minutos, 15 segundos.
- Modos de registro: intervalo fijo (normal), disparo, o estadísticas.

3.4.3 Sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos o adquisición de señales consiste en la toma de muestras reales para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otros componentes electrónicos. Es decir se adquiere un conjunto de señales físicas para convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora. Se requiere una etapa de acondicionamiento que adecue la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de adquisición de datos (DAQ-Data Adquisition). En la presente investigación se utilizaron dos adquirentes de datos: USB-6003 (NI USB-6003, 2016) y USB-6225 (NI USB-6225, 2016) para adquirir la temperatura y humedad al interior de las probetas (Capítulo 3) y al interior de los muros de adobe (Capítulo 5) respectivamente. En la Figura 3.19a se muestra la tarjeta USB-6003 la cual presenta 8 entradas simples analógicas los cuales miden voltajes, con una resolución de 16 bits y una máxima frecuencia de muestreo de 100 KS/s. La tarjeta USB-6225 es de mayor capacidad y posee 80 entradas analógicas, con una resolución de 16 bits y una máxima frecuencia de muestreo de 250 KS/s la cual se muestra en la Figura 3.19b.

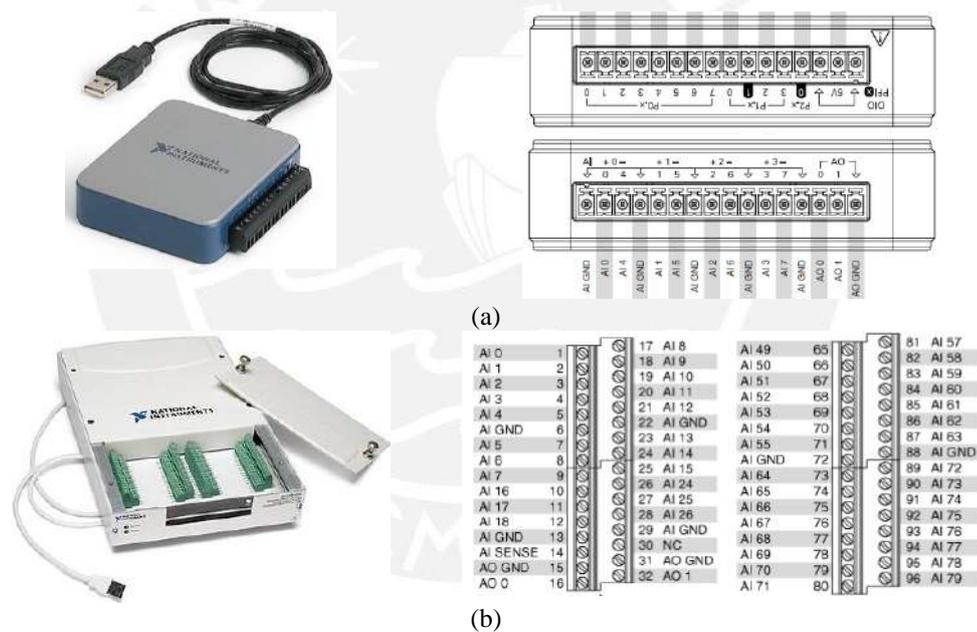


Figura 3.19 Dispositivos de adquisición de datos y conexiones (a) USB-6003 (b) USB-6225.

3.4.4 Software de desarrollo de sistemas NI LabView

El LabView (LabView, 2015) es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación y usa un lenguaje “G” donde esta letra simboliza un lenguaje gráfico. Los programas desarrollados en LabView se llaman instrumentos virtuales o VI’s (Virtual Instrument) y su origen proviene del control de instrumentos y equipos. Hoy en día se ha expandido ampliamente no solo el control de todo tipo de instrumentos electrónicos sino también su programación embebida, adquisición de datos y análisis matemático. El LabView presenta una sintaxis de programación gráfica que facilita visualizar, crear y

codificar sistemas de ingeniería y nos permite reducir tiempos de pruebas y nos ofrece el análisis de grandes cantidades de datos recolectados experimentalmente.

Por lo mencionado anteriormente se ha diseñado una rutina en LabView que nos permite obtener los parámetros ambientales de temperatura y humedad al interior de los especímenes de tierra de manera automatizada. Es decir fue programado para que grabe los cambios de temperatura y humedad en 4 especímenes de tierra instrumentados y colocados al interior de un ambiente controlado. En la Figura 3.20 se muestra el interfaz de la rutina creada.

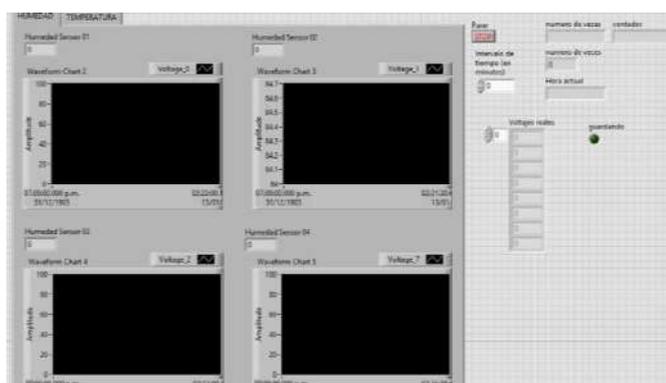


Figura 3.20 Panel frontal VI del programa desarrollado para el monitoreo ambiental.

3.4.5 Monitoreo continuo de temperatura y humedad

El monitoreo continuo de salud estructural implica poder obtener diferentes parámetros que influyen en el comportamiento estructural de diversos tipos de estructuras (concreto, acero, tierra, etc). Según la revisión de la literatura los factores ambientales tienen una gran incidencia en las propiedades dinámicas y mecánicas de sistemas estructurales de tierra y en la actualidad no existen investigaciones que las hayan evaluado. Por tal motivo se pretende entender cómo influyen los parámetros ambientales de temperatura y humedad en el material tierra durante el proceso de secado.

Se instrumentaron 4 especímenes cilíndricos de tierra los cuales se muestran en la Figura 3.21a para monitorear la temperatura y la humedad (interna y ambiental) los cuales se fabricaron en la prensa mecánica ubicada en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP. Se colocaron 2 sensores: 1 de temperatura (modelo LM-35) y 1 de humedad de suelo (modelo FC-28) al interior de cada uno de estos especímenes. Para evaluar la variación de temperatura y humedad en tierra se colocaron las probetas cilíndricas al interior de un ambiente controlado hecho de poliestireno expandido (tecnopor) el cual se muestra en la Figura 3.21b. Este material es un excelente acondicionador de diversos productos, muy ligero, presenta una alta resistencia a la humedad y capacidad de absorción a los impactos. Las pruebas del monitoreo continuo se llevaron a cabo a partir de abril del 2016 y los especímenes fabricados fueron expuestos a condiciones controladas hasta febrero del 2017. El monitoreo continuo se realizó para evaluar la variación de los factores ambientales tanto al interior como al exterior de los especímenes de tierra (Figuras 3.21c). En cada caso la tasa de muestreo fue de una muestra por cada hora durante las 24 horas del día para asegurar el monitoreo continuo de los parámetros ambientales.

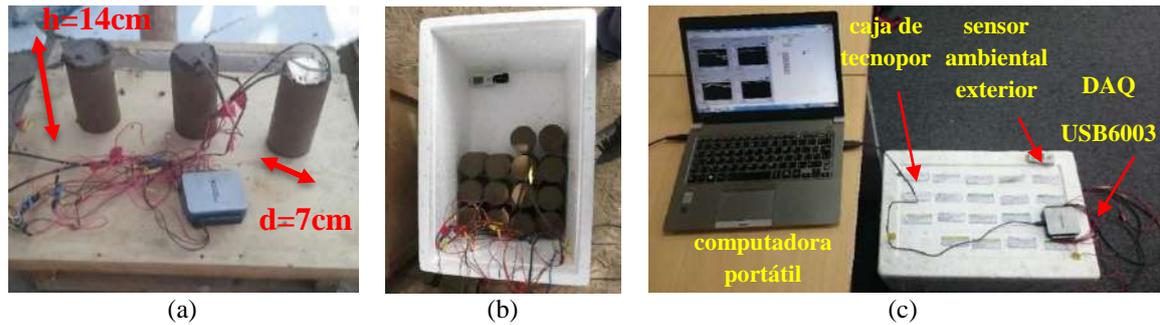


Figura 3.21 (a) Dimensiones de las probetas de tierra (b) Probetas instrumentadas en la caja de tecnopor (c) Sistema de monitoreo de especímenes de tierra.

Ensayo de contenido de humedad

Con el fin de obtener la variación de la humedad interna o contenido de humedad de cada probeta se realizaron una serie de pruebas en el laboratorio de Mecánica de suelos de la PUCP. Estos ensayos consistieron en realizar el control del contenido de humedad en cada probeta de tierra a lo largo del proceso de curado para lo cual se fue sacando uno por uno de la caja de tecnopor. Es por este motivo que se estableció una metodología que nos permita controlar el contenido de humedad a lo largo y ancho de cada espécimen de tierra.

En la Figura 3.22 se muestra el procedimiento y el esquema para tomar las muestras de cada sección de las probetas ensayadas. Primeramente se seccionó la probeta en tres partes iguales denominadas A, B y C y luego cada una de estas se volvió a seccionar en cuatro (1, 2, 3 y 4) por lo que al final se tuvo 12 partes para cada probeta. Enseguida se pesaron estas muestras y se colocaron al horno para su posterior secado y se volvió al día siguiente para volver a pesar obteniendo de esta manera el contenido de humedad de cada espécimen de tierra.

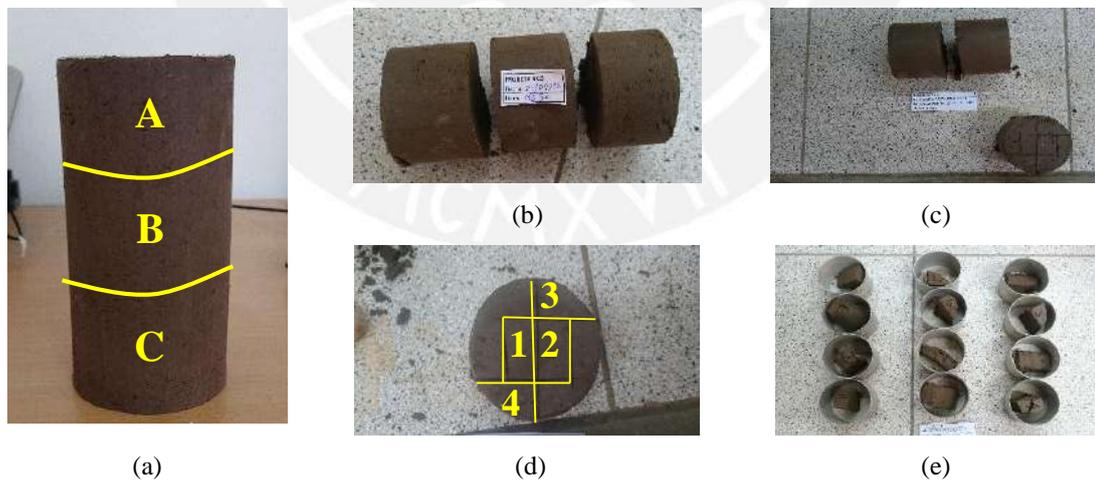


Figura 3.22 Descripción para obtener el contenido de humedad en probetas (a) Esquema de distribución a lo largo (b) Cortes transversales de la probeta (c) Cortes internos de la probeta (d) Esquema de distribución a lo ancho (e) Muestras listas para llevar al horno.

De las mediciones del contenido de humedad de las probetas de tierra a diferentes edades se obtuvo la evolución de esta a lo largo del tiempo. En la Figura 3.23 se muestra el tiempo de curado versus el contenido de humedad. De esta gráfica se obtuvo que a medida que pasa el tiempo el contenido de humedad disminuye en un 60% y esto demuestra que la probeta va

adquiriendo mayor resistencia ya que se va secando al pasar los meses. Estos resultados se ajustaron a una curva lineal que demuestra tener una buena aproximación a los datos del contenido de humedad ya que progresivamente tienden a disminuir. Finalmente se obtuvo un alto coeficiente de determinación R^2 de 0.98.

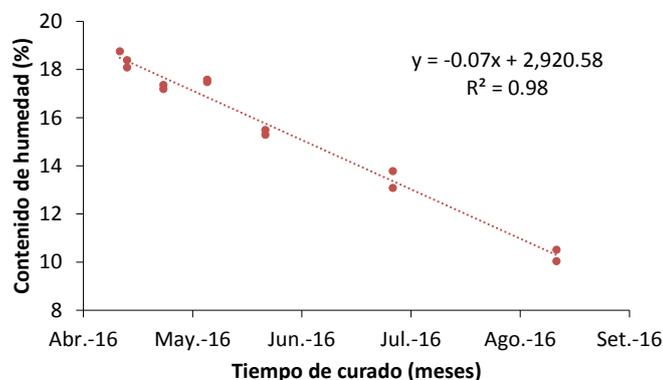


Figura 3.23 Evolución del contenido de humedad de los especímenes de tierra.

3.5 Análisis e interpretación de resultados

Los equipos de medición nos permitieron obtener datos en tiempo real de la temperatura y humedad al interior y al exterior del ambiente controlado mediante un sistema de monitoreo continuo. De las mediciones de cada parámetro ambiental se obtuvieron 5208 muestras durante un periodo de 315 días (45 semanas que equivalen a diez meses) y el periodo de medición empezó en abril del 2016 y terminó en febrero del 2017.

3.5.1 Distribución de la temperatura

Bajo la influencia de la temperatura del ambiente controlado y de todas las probetas juntas se obtuvieron las temperaturas internas en cada probeta. En la Figura 3.24 se muestra los resultados del monitoreo de la temperatura a partir de los sensores LM35 colocados en cada una de las probetas de tierra (T01, T02, T03 y T04). Sin embargo hubo datos que no fueron considerados en el análisis como son los que se aprecian a partir del séptimo mes en la Figura 3.24a debido a que se abrió la caja y ya no se tuvo un ambiente controlado. De las pruebas realizadas el sensor T03 tuvo un inconveniente ya que se malogró en la etapa de fabricación de los especímenes por lo que dio resultados incoherentes y no se consideró en los resultados. La temperatura interna durante los 7 primeros meses se mantuvo prácticamente constante esto debido a que estuvieron en un ambiente controlado. Sin embargo a partir de diciembre se nota un incremento considerable de más de 7°C producto de que se abrió la caja de tecnopor y las probetas ya no se encontraron en un ambiente controlado.

3.5.2 Distribución de la humedad

Con el fin de evaluar la variación de la humedad en probetas de tierra se elaboró un sistema de monitoreo continuo que nos permitió controlar y analizar el tiempo de secado de los especímenes de tierra y ver cómo fueron perdiendo humedad interna a lo largo del tiempo. En la Figura 3.24 se muestra la variación de humedad en cada una de las probetas de tierra (H01, H02, H03 y H04), de los cuales el sensor H03 se malogró y no se consideró en los

resultados. Durante los 7 primeros meses la humedad interna no tuvo un cambio considerable debido a que fueron monitoreados durante el invierno y bajo condiciones controladas. Sin embargo en la Figura 3.24a se muestra que a partir de esa fecha se muestra una caída abrupta debido a que se abrió la caja y finalmente estos resultados no fueron considerados en el análisis ya que no se tuvo condiciones controladas. Finalmente se concluye que las condiciones ambientales en las cuatro probetas fueron controladas de una manera exitosa ya que la temperatura y humedad interna no presentan grandes variaciones.

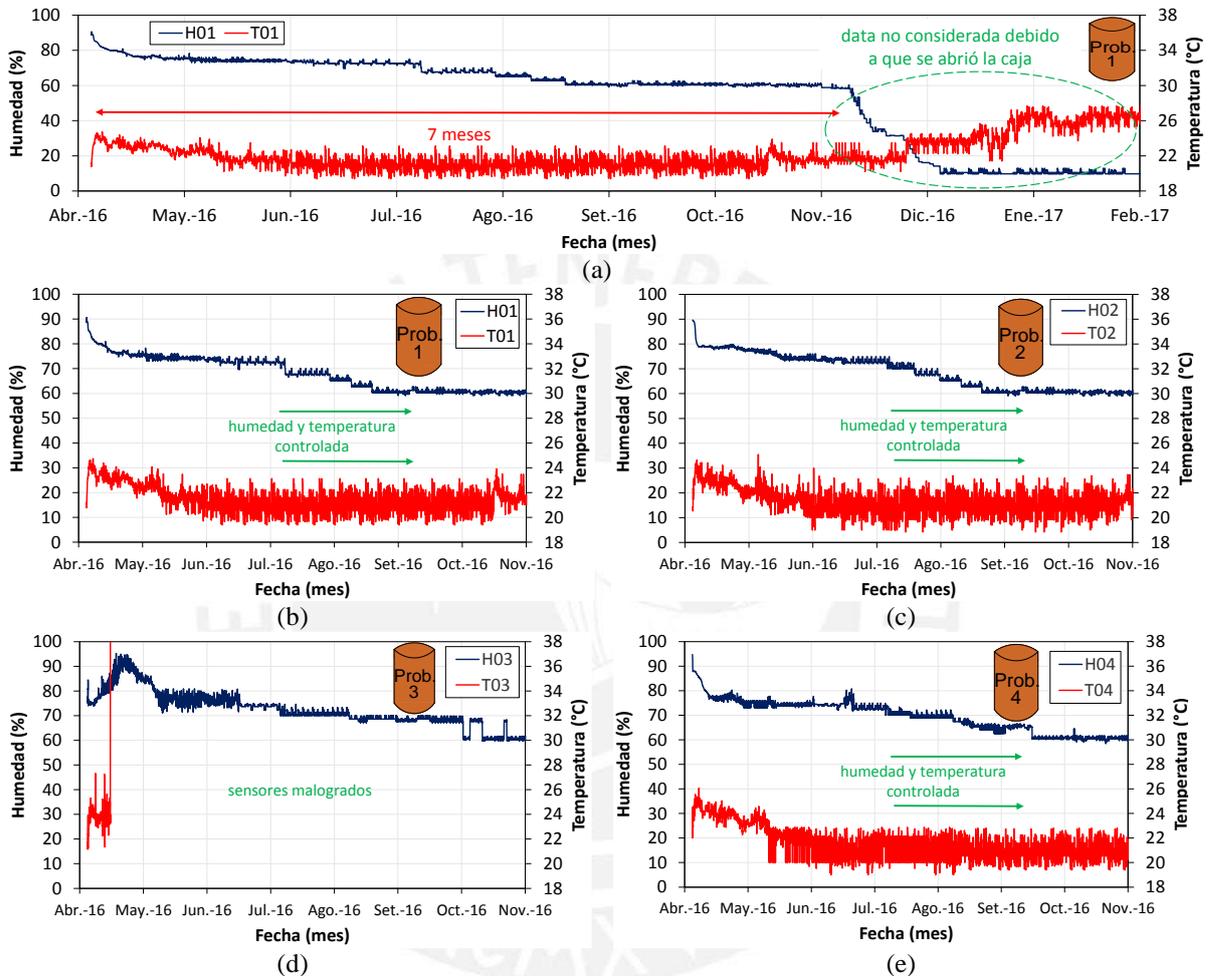


Figura 3.24 Variación de temperatura y humedad al interior de las probetas de tierra (a) Registro completo de la Probeta 1 (b) Probeta 1 (c) Probeta 2 (d) Probeta 3 (e) Probeta 4.

Se utilizaron los sensores HOBO UX100-011 para registrar la temperatura y humedad ambiental tanto al interior como al exterior del ambiente controlado. En la Figura 3.25a se muestra que la humedad interna es prácticamente constante con un valor del 100% durante los 7 primeros meses y esto garantiza un ambiente controlado. De la misma manera se muestra que la temperatura interna del ambiente controlado no presenta una considerable variación diaria (0.5°C) que influya en el proceso de secado de los especímenes de tierra. Por otro lado en la Figura 3.25b se muestra los registros de la humedad y temperatura externa al ambiente controlado y se ve que existe una variación de los factores ambientales de 2°C en promedio para la temperatura y de 7% para la humedad ambiental.

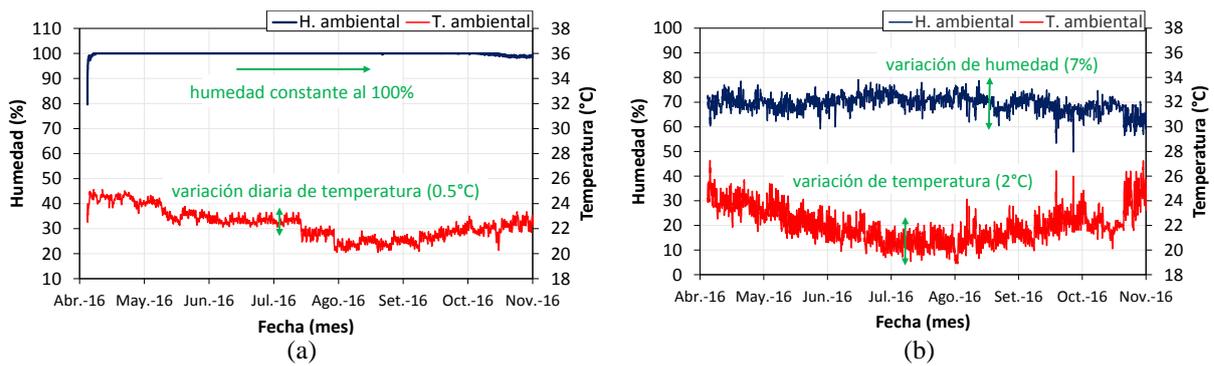


Figura 3.25 Variación de temperatura y humedad ambiental. (a) Al interior del ambiente controlado (b) Al exterior del ambiente controlado.

En la Figura 3.26a se muestra la variación de la temperatura y humedad interna en los 3 sensores que muestran similares valores debido a que fueron evaluadas en las mismas condiciones ambientales. El monitoreo continuo inició en abril del 2016 y la humedad interna de cada espécimen de tierra fue de 90% para la probeta 1, 90% para la probeta 2 y 95% para la probeta 4. La humedad interna fue disminuyendo lentamente conforme fueron transcurriendo los días hasta un valor promedio de 59%, manteniéndose en este valor hasta los siete meses con lo que se logró controlar la humedad al interior de la caja. Se pudo obtener que la temperatura de la probeta 1 aumentó en 2.0°C, de la misma manera en la probeta 2 y 4 se muestra un aumento de 2.1°C y 2.2°C respectivamente. La humedad interna fue cambiando en sentido contrario a la temperatura ya que en la probeta 1, 2 y 4 disminuyó en 31%, 32% y 36% respectivamente. La Figura 3.26b muestra que la humedad promedio al interior de las probetas disminuyó en 33% y la temperatura aumentó en un promedio de 2.1°C durante los meses que duró el ensayo.

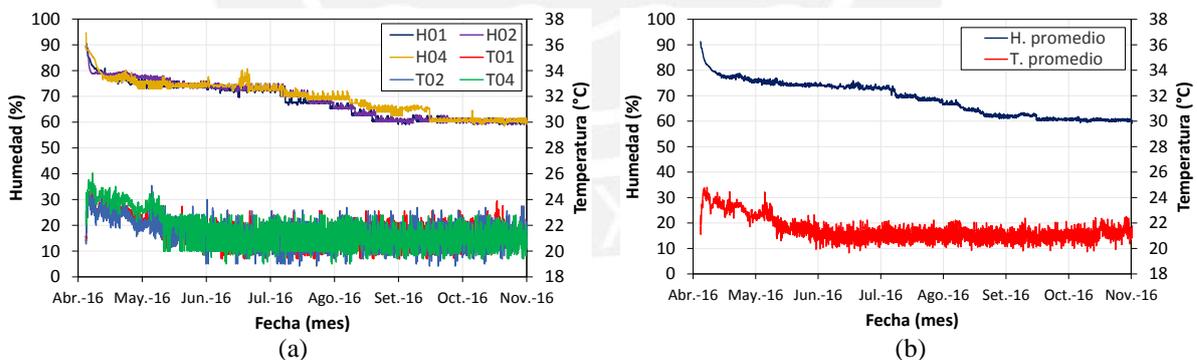


Figura 3.26 Variación de temperatura y humedad interna. (a) Todas las probetas (b) Promedio de las 3 probetas.

En la Tabla 3.5 se muestra un resumen de los resultados de los factores ambientales de la temperatura y humedad al interior de los especímenes de tierra.

Tabla 3.5 Variación de humedad y temperatura al interior de las probetas.

	Humedad (%)			Temperatura (°C)		
	Inicial	Final	Variación	Inicial	Final	Variación
Probeta 01	90	59	31	21.1	23.1	2.0
Probeta 02	90	58	32	20.9	23.0	2.1
Probeta 04	95	59	36	23.1	25.3	2.2

En la Figura 3.27 se realizó una comparación de los parámetros ambientales (temperatura y humedad) al interior de las probetas y al exterior e interior del ambiente controlado. Al inicio del ensayo la humedad ambiental al interior del ambiente controlado fue de 80% y en unas 8 horas se incrementó rápidamente a un valor constante de 100%. Este valor duró hasta los 7 meses de monitoreo lo que garantiza un ambiente controlado. Con respecto a la temperatura dentro del ambiente controlado inicialmente fue de 24.0°C y conforme fue pasando el tiempo este se incrementó lentamente hasta llegar a 26.0°C (es decir varía 2.0°C).

La humedad ambiental inicial afuera del ambiente controlado fue de 71% y conforme pasó el tiempo fue variando en un rango entre 50% y 80%. La temperatura inicial al exterior del ambiente controlado fue de 24.3°C y la final llegó a un valor de 27.0°C, variando en un rango de 8.0°C entre 19.0°C y 27.0°C. En todos los especímenes de tierra la tendencia de la temperatura interna va asemejándose a la temperatura ambiental al exterior de la caja de tecnopor, esto debido a que conforme pasa el tiempo se va dando un equilibrio térmico.

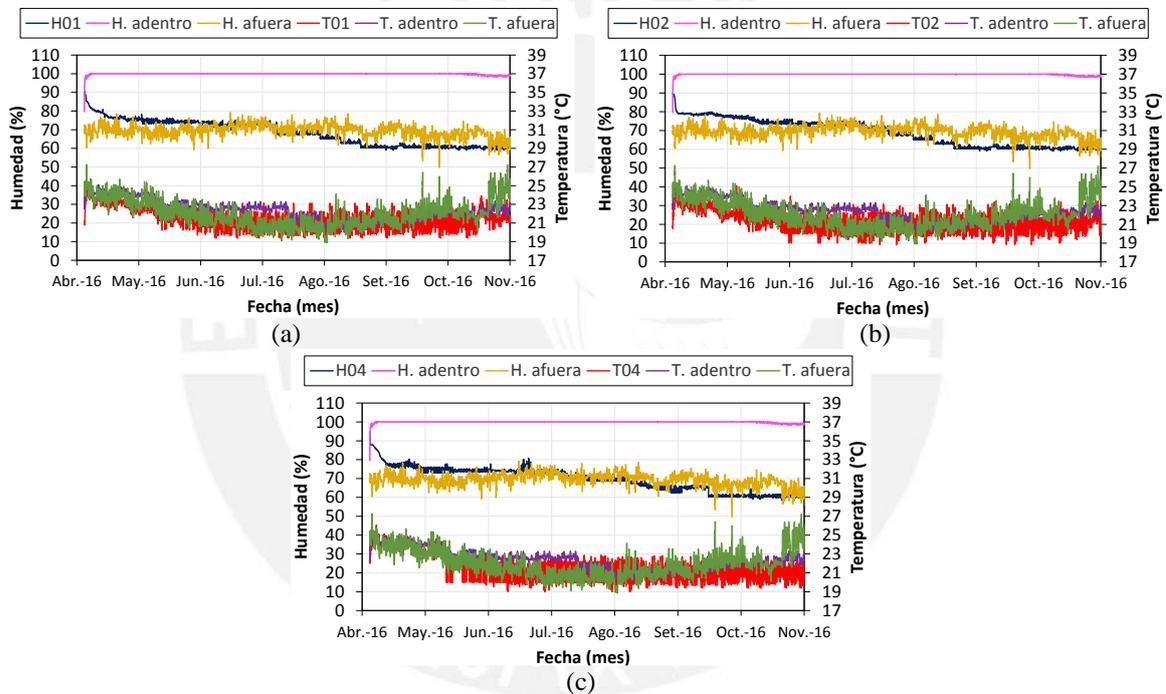


Figura 3.27 Comparación de todos los parámetros ambientales (a) Probeta 1 (b) Probeta 2 (c) Probeta 4.

3.5.3 Propuesta de curvas de aproximación

En base a los resultados del monitoreo permanente de la humedad y temperatura al interior de los especímenes de tierra se logró realizar ajustes del tipo polinómico los cuales se muestran en la Figura 3.28. Para lo cual se obtuvo un promedio de los valores de la humedad y temperatura en las probetas 1, 2 y 4. En el caso de la humedad se consiguió un ajuste polinómico de cuarto grado que se muestra en la Ecuación 3.3 y el $R^2 = 0.87$ el cual está cercano a 1 por lo que indica que la curva presenta una buena aproximación. Para la temperatura se obtuvo un ajuste polinómico de segundo grado (Ecuación 3.4), de la misma manera presenta una buena aproximación ya que el valor de $R^2 = 0.85$.

$$y = 0.000002H^4 - 0.0261H^3 + 1613.8H^2 - 4x10^7H + 5x10^{11} \quad (3.3)$$

$$y = 0.0002T^2 - 16.557T + 340657 \quad (3.4)$$

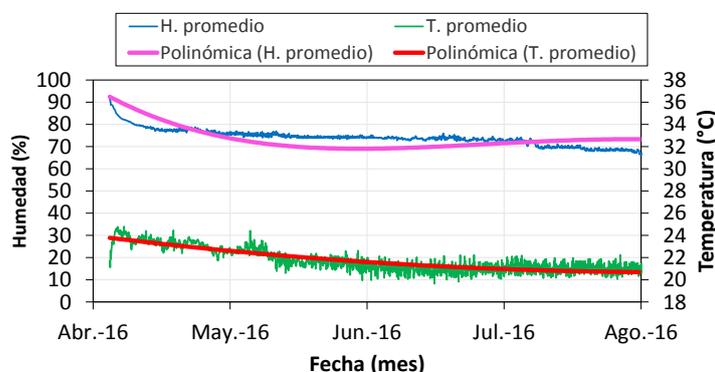


Figura 3.28 Curvas de aproximación de la humedad y temperatura al interior de las probetas de tierra.

Finalmente se realizó una comparación entre el contenido de humedad y la resistencia a la compresión la cual se muestra en la Figura 3.29. De esta gráfica se puede observar que los datos se ajustan a una función exponencial ya que el valor del R^2 es alto de 0.96. Con esto se demuestra que a medida que pasan los meses (tiempo de curado) el contenido de humedad disminuye en 60% y la resistencia de los especímenes aumenta en 8%.

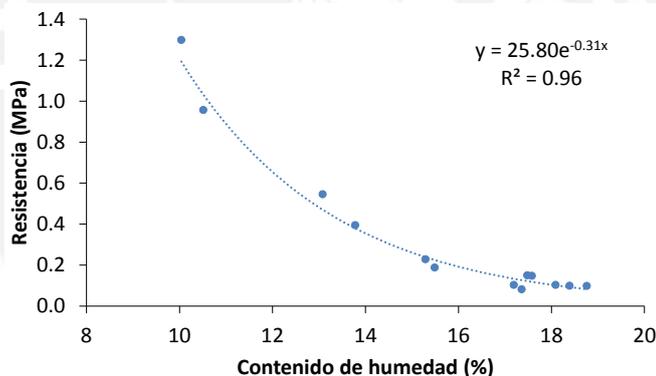


Figura 3.29 Correlación entre el contenido de humedad y la resistencia a compresión.

En conclusión las curvas ajustadas dieron buenos resultados para predecir el comportamiento interno de los factores ambientales en probetas de tierra y así la humedad interna sirvió para evaluar el tiempo de secado al interior de un ambiente controlado. Durante la estación de invierno y por un periodo de 7 meses las probetas siguen manteniendo más del 50% de su humedad inicial, sin embargo cuando la temperatura incrementa los especímenes pierden rápidamente su humedad interna. De la misma manera se encontró una curva que relacione el contenido de humedad y la resistencia a la compresión de los especímenes de tierra los cuales se pueden usar perfectamente para evaluar el tiempo de secado. Con respecto a la temperatura interna se pudo controlar la evolución de esta durante los cambios de estaciones y ver como es un factor predominante en el estudio del tiempo de secado de los especímenes de tierra.

Capítulo 4

Validación experimental de la influencia de la temperatura y humedad en un péndulo de metal

Resumen

En este capítulo se estudió la influencia de los factores ambientales en las propiedades dinámicas de un sistema estructural de acero. Para tal fin se diseñó un espécimen de péndulo invertido de acero el cual fue instrumentado con sensores de aceleración, temperatura y humedad para ser monitoreado durante 3 meses. En primer lugar los resultados obtenidos nos sirvieron para validar que los parámetros dinámicos (frecuencias de vibración, amortiguamiento y formas modales) sean los correctos y que puedan ser medidos a lo largo de varios meses de forma continua y automática sin que haya problemas de cualquier tipo. Como siguiente prueba se sometió el espécimen a un incremento considerable de temperatura, inducido mediante focos halógenos para estudiar como varían las frecuencias de vibración.

4.1 Introducción

Un sistema de monitoreo de salud estructural (SHM) para una estructura de ingeniería civil es la combinación de diversos equipos adecuados para obtener permanentemente las respuestas durante su vida útil (Magalhães, 2010). En realidad, el concepto de SHM se ha venido desarrollando durante varios años utilizando diversas fuentes de excitación (estáticas y dinámicas), sin embargo para la presente investigación se obtuvieron mediciones de aceleraciones a través de pruebas de vibración ambiental. Para obtener los parámetros dinámicos de estructuras reales es necesario contar con sistemas sofisticados y de gran performance. Sin embargo como punto de partida y para entender la metodología de monitoreo de estructuras, se construyó un espécimen de péndulo de metal invertido debido a que es una estructura simple de analizar de 1 grado de libertad, el cual nos sirve para evaluar de una forma más sencilla el efecto de los parámetros ambientales en las propiedades dinámicas.

4.2 Descripción de los sensores de medición y sistemas de adquisición

Los sensores considerados para medir los parámetros dinámicos son del tipo acelerómetros uniaxiales (PCB, 2016), marca *PCB Piezotronics*, modelo 393B12 el cual se muestra en la Figura 4.1a.

Las especificaciones técnicas más importantes son:

- Sensibilidad ($\pm 10\%$) = 10 000 mV/g.
- Rango de medición 0.5 g pk.
- Rango de frecuencia ($\pm 10\%$) = 0.10 a 2000 Hz.
- Rango de temperatura -45 °C a 82 °C.
- Peso 210 gramos.
- Tamaño 30.2 mm x 56.1 mm (ancho x altura).
- Este sensor incluye una cubierta térmica para la protección principal al aire libre en el caso de monitoreo de estructuras expuestas al medio ambiente.

El sistema de adquisición considerado es el DAQ NI9234 (NI, 2016) de *National Instruments* el cual se muestra en la Figura 4.1b.

Las especificaciones técnicas más importantes son:

- Número de canales = 04 canales de entrada analógica
- Resolución del convertidor análogo digital (ADC Analog-to-Digital Converter) = 24 bits.
- Velocidad máxima de muestreo por canal 51.2 km/s.
- Tensión de entrada ± 5 V.
- Rango de temperatura -40 °C a 70 °C.
- Peso 173 gramos.

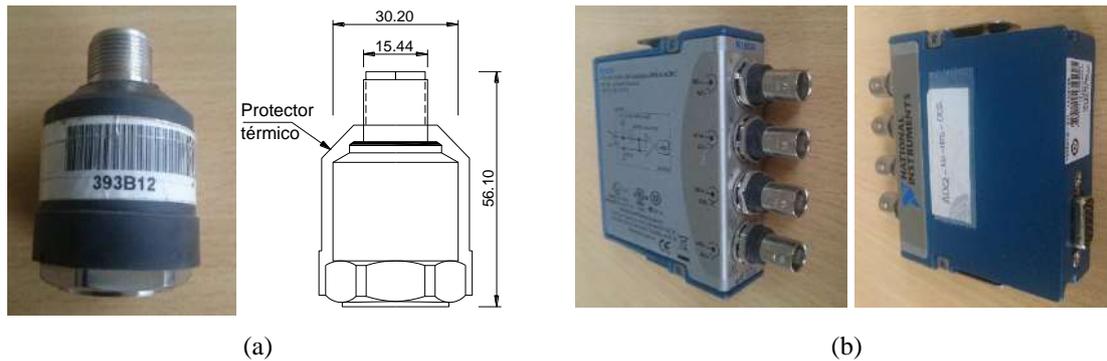


Figura 4.1 Sensores de aceleración y sistema de adquisición: (a) acelerómetros PCB Piezotronics (dimensiones en mm) (b) Sistema de adquisición DAQ modelo NI 9234.

Para realizar la medición de parámetros ambientales (temperatura y humedad ambiental) se utilizó un sensor integrado digital modelo UX100-011 HOBO, las especificaciones técnicas se describen a detalle en el Capítulo 3.

4.3 Ensayo experimental de monitoreo dinámico

4.3.1 Descripción del espécimen estudiado

En el campo de la ingeniería estructural se trata de crear modelos muy simples los cuales nos permitan representar de una manera más sencilla el comportamiento dinámico de estructuras complejas. Por tal motivo se construyó un péndulo invertido de metal que representa una estructura simple de un grado de libertad, que nos sirvió para entender los fundamentos de la dinámica de estructuras como frecuencias de vibración, amortiguamiento, formas modales, etc. En la presente investigación, esta estructura fue usada como una herramienta para evaluar cómo afectan los factores ambientales (temperatura y humedad) en las propiedades dinámicas del acero (frecuencias de vibración) y poder probar la eficiencia de las rutinas creadas para el monitoreo continuo y permanente.

El péndulo invertido construido en el laboratorio tiene 1.85 m de alto y la viga es de acero A36 ($E = 2 * 10^{11} Pa$ y $\rho = 7850 kg/m^3$), de una sección transversal tubular rectangular de 40 mm x 60 mm y espesor de 3 mm, la base está constituida por una plataforma pesada de acero que asume la condición de empotramiento perfecto. En la parte superior existe una base de metal a la cual se va adicionando diferentes pesos que simboliza el efecto de la masa concentrada. En la Figura 4.2 se muestra las características geométricas del espécimen.

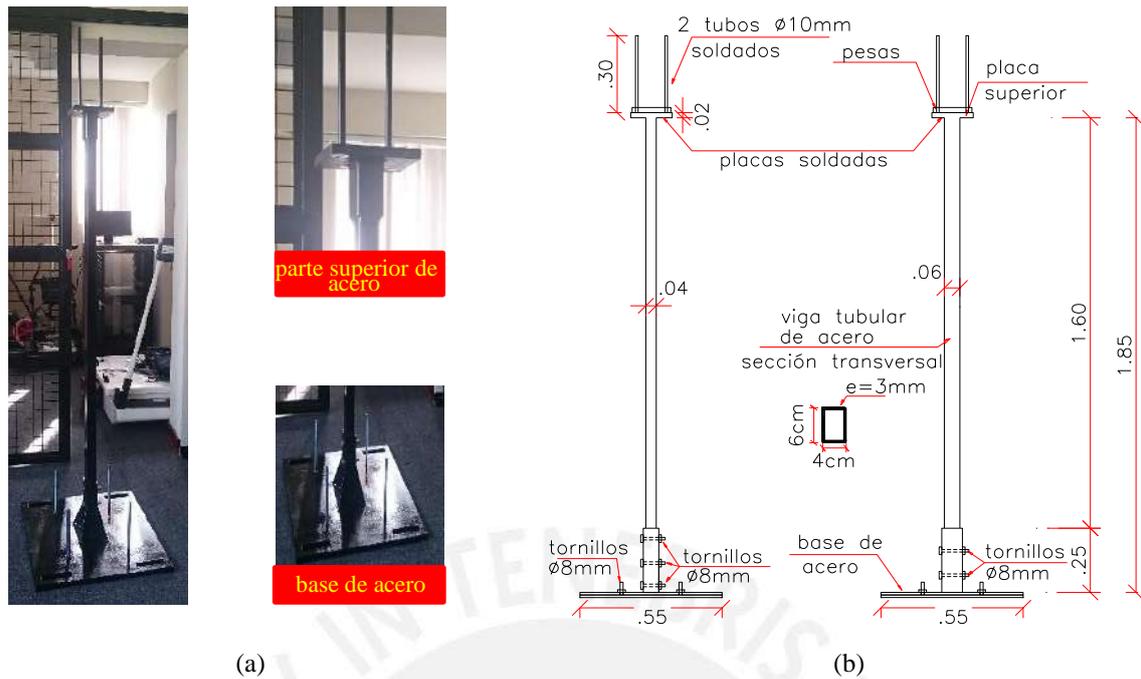


Figura 4.2 Descripción del espécimen de acero (a) péndulo ubicado en el laboratorio (b) Características geométricas (dimensiones en m.).

El espécimen de péndulo de acero fue diseñado de tal manera que sus propiedades dinámicas pudieran ser controladas cambiando la cantidad de masa situada en la parte superior mediante la adición de pesas (cada pesa = 3.4kg). La solución analítica de la respuesta dinámica del espécimen obedece a la ecuación dinámica dada por Chopra, (1995), la cual es válida para un sistema estructural de 1 gdl, de esta manera se puede calcular la frecuencia mediante la ecuación 4.1.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{m}} \quad (4.1)$$

Donde:

f = denota la frecuencia en Hz

k = rigidez en N/m^2

m = masa en kg

E = módulo de elasticidad en Pa

I = momento de inercia en m^4

h = altura del espécimen de acero en m

Usando la ecuación 4.1 y considerando la variación de la masa del espécimen, se calculó la respuesta dinámica del péndulo con diferentes configuraciones. Los resultados analíticos correspondientes a las primeras dos formas de modo traslacionales son mostrados a continuación en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Primeras dos frecuencias obtenidas a través de la ecuación 4.1.

Frecuencia (Hz)	Ninguna masa	$m_{adi}=3.4\text{kg}$ $m_{tot}=11.26$	$m_{adi}=6.8\text{kg}$ $m_{tot}=14.66$	$m_{adi}=10.2\text{kg}$ $m_{tot}=18.06$	$m_{adi}=13.6\text{kg}$ $m_{tot}=21.46$	$m_{adi}=17\text{kg}$ $m_{tot}=24.86$	$m_{adi}=20.4\text{kg}$ $m_{tot}=28.26$
Frecuencia 1	5.81	5.01	4.94	4.36	4.00	3.72	3.49
Frecuencia 2	7.82	6.61	6.10	5.98	5.53	5.14	4.82

Las masas adicionales pesan 3.4kg y se fueron adicionando una a una hasta llegar a una masa final de 20.4kg. De acuerdo a los resultados de la Tabla 4.1 se puede apreciar como disminuyen las dos primeras frecuencias de vibración conforme se van adicionando las pesas. En el siguiente acápite se comprobará estos resultados mediante la elaboración de un modelo numérico.

4.3.2 Análisis modal del espécimen de acero

Con el fin de obtener los parámetros dinámicos (frecuencias y formas de vibración) del espécimen estudiado, se ha desarrollado un modelo en elementos finitos en el software DIANA, 2006 utilizando elementos sólidos (Ver Figura 4.3a). De esta manera se ha logrado obtener las 3 primeras frecuencias de vibración y se pudo corroborar los dos primeros modos traslacionales con los resultados obtenidos analíticamente (utilizando la Ecuación 4.1). En la Figura 4.3 se aprecia las primeras 3 formas modales del péndulo invertido de metal con las tres frecuencias características de vibración.

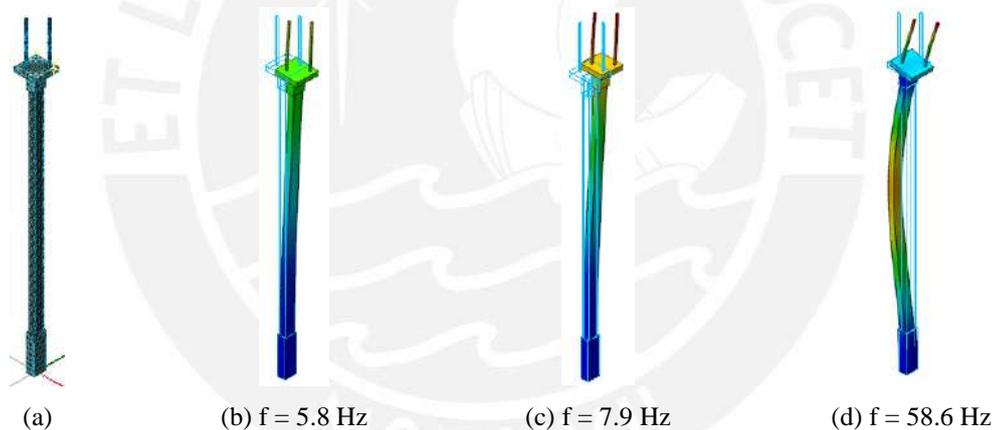


Figura 4.3 Formas de vibración del péndulo invertido de metal (a) Modelo numérico en TNO DIANA (b) Modo 1 (c) Modo 2 (d) Modo 3.

4.3.3 Identificación modal automática

Con el fin de obtener los parámetros dinámicos (frecuencias) del péndulo invertido de metal, se realizó el monitoreo continuo y automatizado mediante vibración ambiental durante un periodo de 3 meses. Para tal sentido se instrumentó el espécimen de acero con 4 sensores de aceleración ubicados como se aprecia en la Figura 4.4, esta disposición de sensores nos permite obtener las primeras 3 frecuencias de vibración y formas modales características de la estructura. Las frecuencias naturales fueron obtenidas mediante el método de Identificación de Subespacio Estocástico (SSI-Data) que fue implementado en el software LabView (Boroschek y Bilbao, 2015). Esta rutina nos permite realizar un monitoreo continuo y automatizado de los parámetros dinámicos (frecuencias, amortiguamiento, formas modales), sin embargo en la presente investigación solo se consideró el estudio de

las frecuencias de vibración. El tiempo de obtención de archivos fue de 10 minutos por cada hora, con una frecuencia de muestreo de 256Hz.

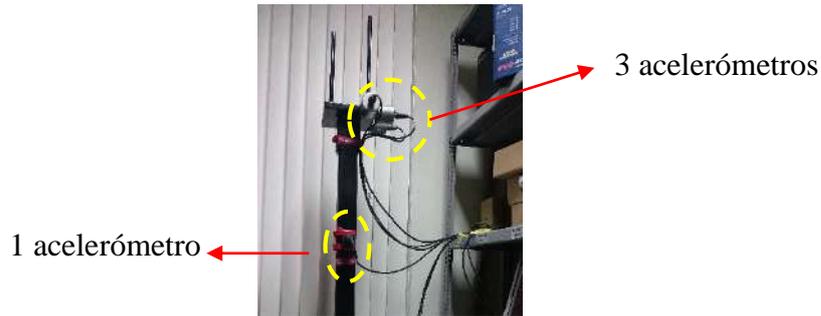


Figura 4.4 Ubicación de acelerómetros.

En la Figura 4.5a se muestran las 3 primeras frecuencias naturales de vibración identificadas con el método SSI-Data. Como se puede observar las 3 frecuencias prácticamente son constantes durante los 3 meses que duró el monitoreo. Durante el período de medición hubo algunas interrupciones debido a un fallo en el sistema de adquisición de datos, falta de energía eléctrica, problemas de rutina, etc. Por otro lado en la Figura 4.5b se muestra que existe un descenso de las frecuencias de vibración durante un mes y medio, esto se debe a que en ese periodo de monitoreo se colocó un peso de 3.4kg por lo que la estructura es más rígida. Como se puede observar las frecuencias obtenidas mediante la identificación automática son muy parecidas a las obtenidas con el modelo numérico y analítico, un resumen de estas frecuencias se resumen en la Tabla 4.2, vale recordar que con el modelo analítico solo se pudo obtener las dos primeras frecuencias (ver acápite 4.31).

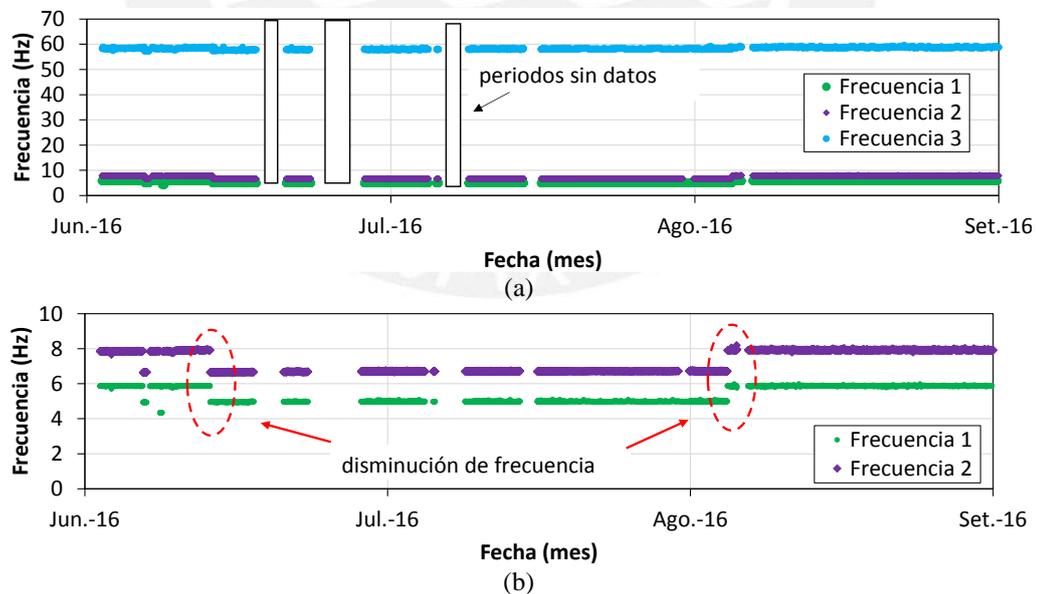


Figura 4.5 Identificación modal automática (a) Frecuencias naturales identificadas (b) Variación de las dos primeras frecuencias debido al peso adicional.

Tabla 4.2 Resumen de frecuencias de vibración para el espécimen de acero.

Frecuencia (Hz)	Modelo analítico	Modelo numérico	Identificación automática
Frecuencia 1	5.8	5.9	5.8
Frecuencia 2	7.8	7.9	7.9
Frecuencia 3	-	58.7	58.8

4.3.4 Monitoreo de parámetros ambientales

Con el fin de obtener los factores ambientales (temperatura y humedad), se utilizó un sensor integrado digital modelo UX100-011 HOBO. Se realizó un monitoreo continuo y totalmente automatizado y el sensor fue configurado para obtener una muestra por cada hora durante 3 meses. En la Figura 4.6a se muestra la ubicación del sensor ambiental durante el periodo de monitoreo y en la Figura 4.6b se observa la variación de temperatura y humedad ambiental. De estos resultados se muestra como estos dos factores tienen una relación inversa.

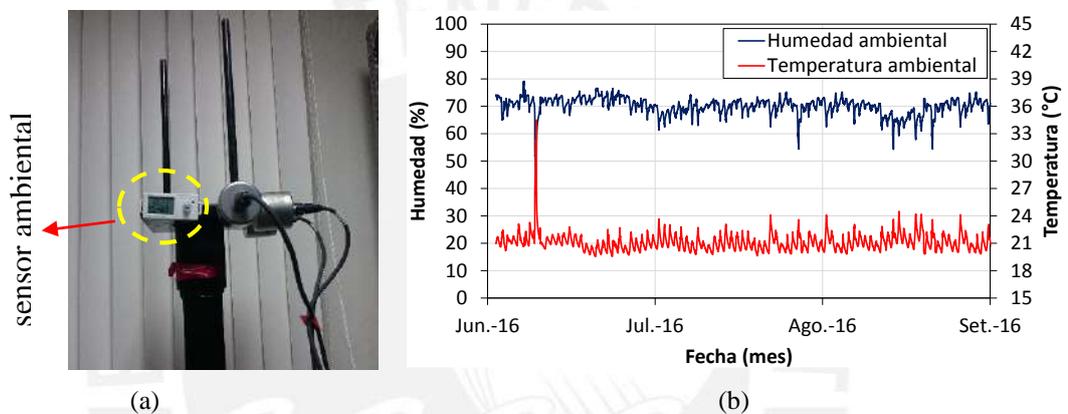


Figura 4.6 Monitoreo de factores ambientales (a) Instrumentación ambiental del espécimen de acero (b) Variación de los factores ambientales temperatura y humedad.

El estudio de los efectos ambientales se basó inicialmente en el supuesto de que la respuesta modal varía por la influencia de dos variables ambientales (temperatura y humedad). Los resultados estadísticos de las variables ambientales y dinámicas se muestran en la Tabla 4.3. Los valores promedio de temperatura y humedad relativa son 21°C y 70%. También se presenta la desviación estándar “ σ ” y el coeficiente de variación (CV), donde se nota claramente que no existe una gran variabilidad de los datos. Con respecto a los valores extremos, los valores mínimo y máximo son 20°C y 24°C para la temperatura y 54% y 77% para la humedad relativa del aire. Estas variaciones se deben a que el espécimen de acero estuvo durante todo el tiempo al interior del laboratorio y no fue expuesto al medio ambiente.

Tabla 4.3 Resultados estadísticos del espécimen de acero.

Resultados	Parámetros ambientales		Parámetros dinámicos		
	Temperatura (°C)	Humedad (%)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)
Promedio	21.0	70	5.87	7.92	58.80
σ	0.783	2.915	0.018	0.020	0.141
CV (%)	3.73	4.18	0.31	0.25	0.24
Máximo	24.0	77	5.99	8.19	59.63
Mínimo	20.0	54	5.75	7.79	58.43

A partir de este análisis estadístico debe tomarse importancia a la poca variación en las frecuencias naturales durante todo el periodo de monitoreo. Ya que el espécimen de acero no estuvo expuesto a los cambios significativos de los factores ambientales, puesto que el espécimen estuvo aislado en el laboratorio.

Los resultados estadísticos de los parámetros modales estimados también se presentan en la Tabla 4.3. En este caso, el promedio de las tres frecuencias es de aproximadamente 5.87, 7.92 y 58.80 Hz, con el orden de variabilidad parecido para los 3 casos, y con valores de CV entre 0.24 y 0.31%, lo que se demuestra que las frecuencias no sufren gran variación durante el tiempo de monitoreo.

4.4 Correlación entre las frecuencias identificadas y factores ambientales

Durante el periodo de monitoreo se obtuvieron resultados de las tres primeras frecuencias del espécimen estudiado y para ver si existe alguna influencia de los factores ambientales se tuvo que utilizar una escala mucho mayor para las frecuencias. En la Figura 4.7 (a, b y c) se muestra que existe una correlación ligeramente inversa entre las frecuencias y la temperatura ambiental, es decir cuando la temperatura incrementa las frecuencias disminuyen y viceversa. Por otro lado en la Figura 4.8 (a, b y c) se muestra lo contrario, es decir que existe una correlación directa entre la frecuencia y la humedad ambiental.

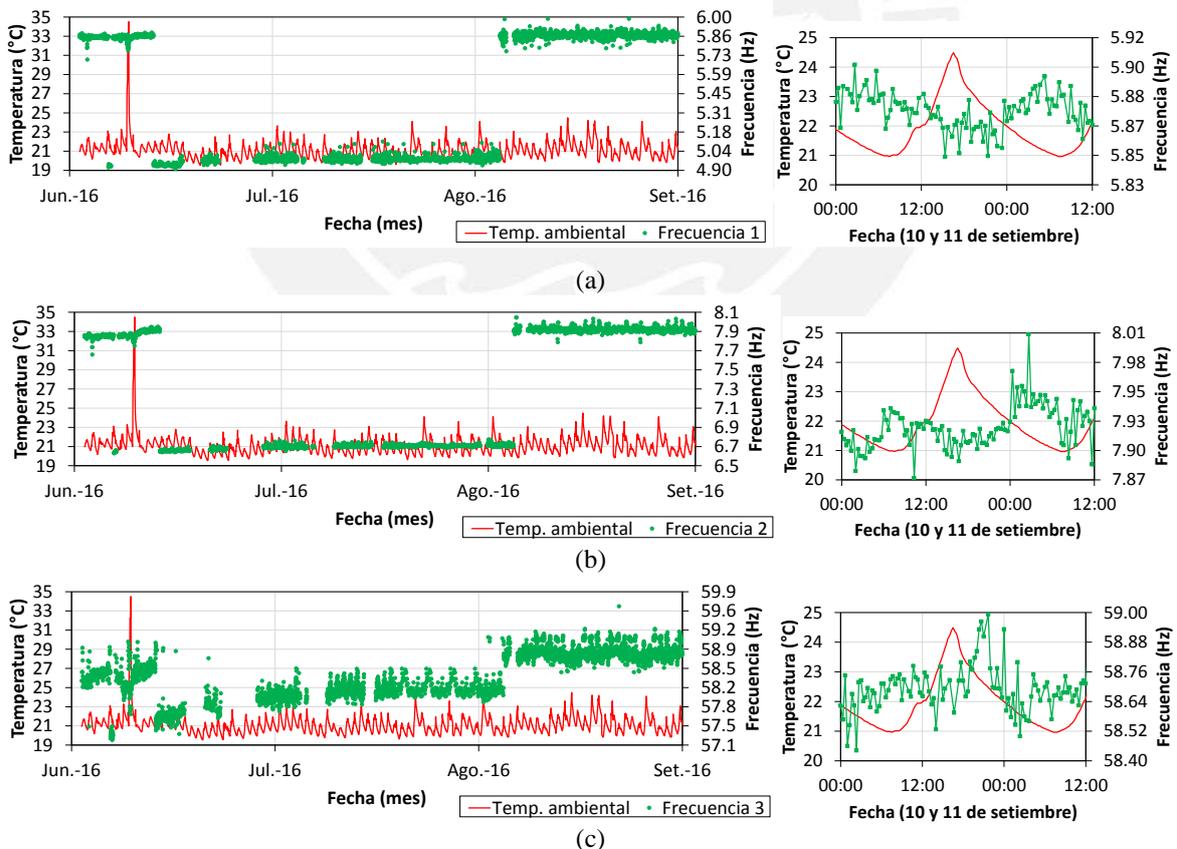


Figura 4.7 Correlación entre frecuencias y temperatura ambiental durante los 3 meses y durante 2 días (a) Frecuencia 1 y temperatura (b) Frecuencia 2 y temperatura (c) Frecuencia 3 y temperatura.

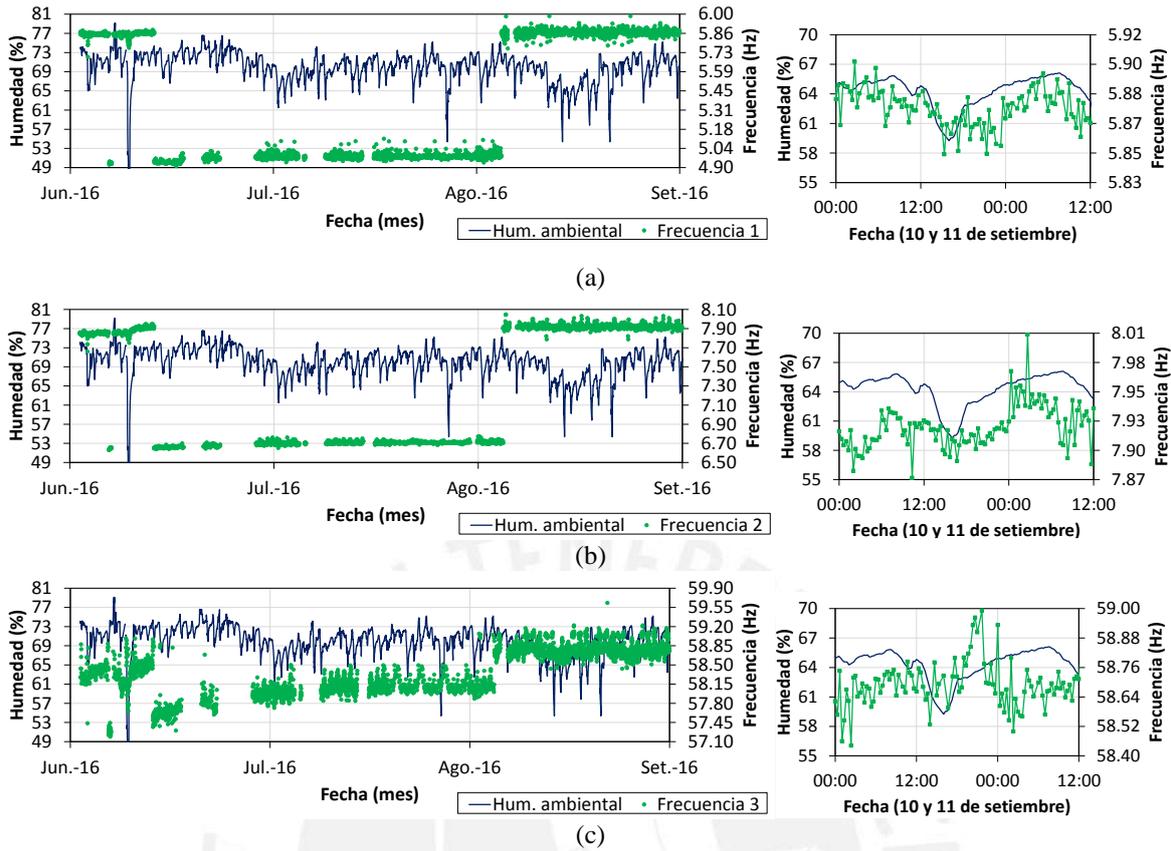


Figura 4.8 Correlación entre frecuencias y humedad ambiental durante los 3 meses y durante 2 días (a) Frecuencia 1 y humedad (b) Frecuencia 2 y humedad (c) Frecuencia 3 y humedad.

Con el fin de demostrar el fenómeno de disminución de las frecuencias a medida que la temperatura incrementa se hizo una revisión bibliográfica entre la relación del módulo de elasticidad y la temperatura para el material acero. En la Figura 4.9 se observa la ley constitutiva térmica para el acero el cual se encuentra en (Yan, 2005) y está demostrada en base a ensayos de laboratorio. Se observa que para cualquier rango de temperatura, el módulo de elasticidad disminuye a medida que la temperatura incrementa. Si se considera que el módulo de elasticidad disminuye al aumentar la temperatura, se puede obtener que las frecuencias disminuyen ya que en la ecuación 4.1 se observa que existe una relación inversa entre el módulo de elasticidad y las frecuencias. Para el caso de la humedad ambiental es todo lo contrario ya que posee un comportamiento inverso a la temperatura.

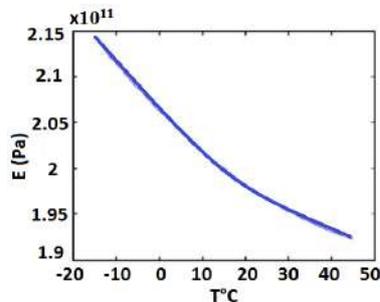


Figura 4.9 Ley constitutiva térmica del acero. Adaptado de (Yan, 2005).

Para analizar mejor la relación entre las variables ambientales y las frecuencias de vibración, la Figura 4.10 y la Figura 4.11 muestran en detalle las series de datos para los efectos de la temperatura y humedad respectivamente. En general, existe una relación ligeramente positiva entre la temperatura y la frecuencia, y una relación ligeramente negativa entre la humedad y la frecuencia. Sin embargo se comprueba que no existe gran variación de las frecuencias de vibración por efectos de temperatura y humedad ambiental durante todo el tiempo de monitoreo. Esto se comprueba ya que el espécimen de acero estuvo todo el tiempo al interior del laboratorio y adicionalmente se realizó durante el invierno en donde la temperatura no sufre grandes variaciones.

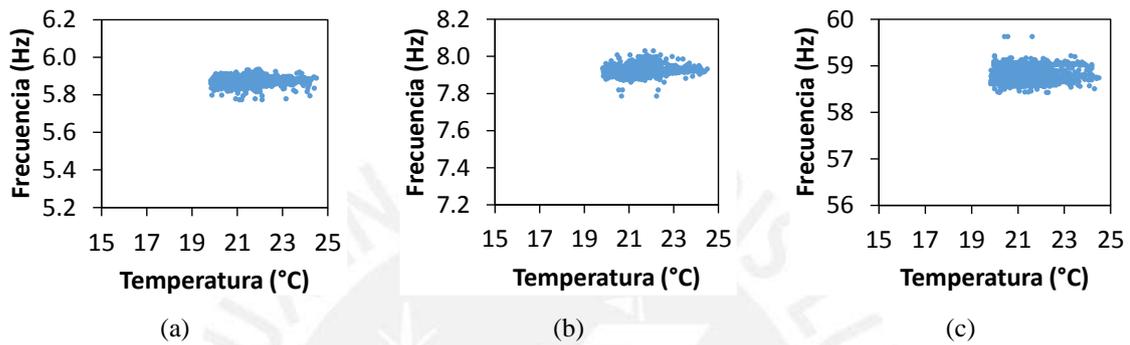


Figura 4.10 Frecuencias versus temperatura (a) Frecuencia 1 vs temperatura (b) Frecuencia 2 vs temperatura (c) Frecuencia 3 vs temperatura.

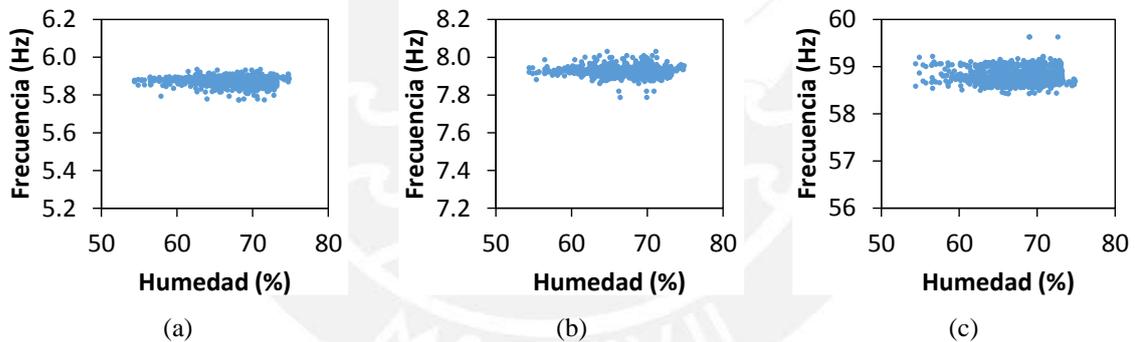


Figura 4.11 Frecuencias versus humedad (d) Frecuencia 1 vs humedad (e) Frecuencia 2 vs humedad (f) Frecuencia 3 vs humedad.

4.5 Ensayo de calentamiento

En el contexto del estudio del efecto negativo que tiene la variación de la temperatura sobre las propiedades dinámicas de sistemas estructurales, se realiza una evaluación del incremento inducido de la temperatura sobre el espécimen de acero. Para tal efecto en la Figura 4.12a se muestra la instrumentación del péndulo invertido en donde se utilizaron 4 sensores de aceleración y 1 sensor ambiental integrado de temperatura y humedad.

El ensayo consistió en realizar un monitoreo continuo de los parámetros ambientales y dinámicos durante 1 día (Ver Figura 4.12b), para esto se colocó el espécimen dentro de un ambiente controlado y se fue incrementando la temperatura a través de 2 focos halógenos de 500 W cada uno, estos estuvieron prendidos por un tiempo de 6 horas a partir de las 10:00 am hasta las 4:00 pm y luego se dejó enfriar el ambiente hasta el día siguiente.

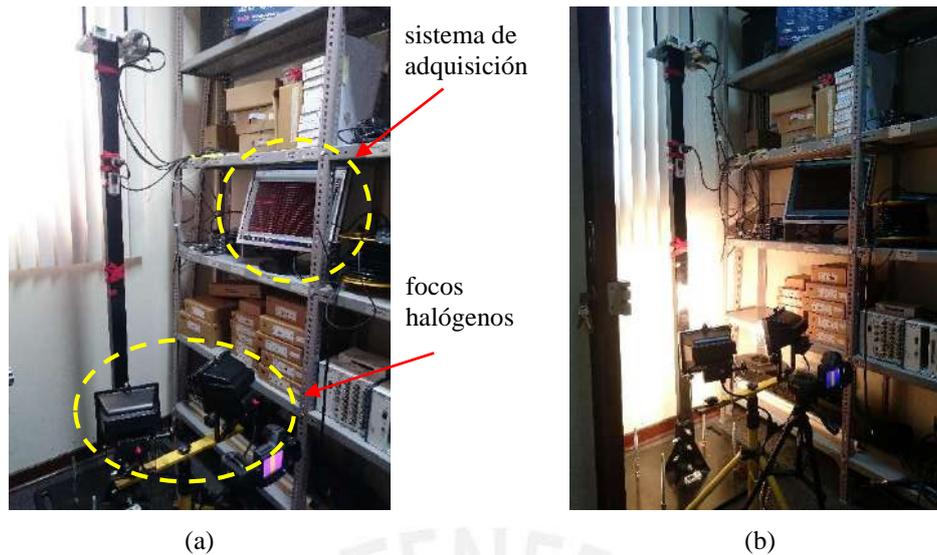


Figura 4.12 Ensayo de calentamiento (a) Detalle de la instrumentación (b) Especimen ensayado con incremento de la temperatura.

Los resultados del ensayo se muestran en las Figura 4.13, Figura 4.14 y Figura 4.15, y como era de esperarse se corrobora lo que la revisión bibliográfica nos menciona, que al inducir un incremento de temperatura las frecuencias de vibración disminuyen (Kodur & Harmanthy, 2002). Sin embargo como el espécimen ensayado fue de material acero, la resistencia al incremento de la temperatura es muy grande y las propiedades dinámicas no sufren variaciones considerables. Los resultados muestran la disminución de las 3 frecuencias cuando se induce un incremento de temperatura de 12°C . Las frecuencias 1, 2 y 3 disminuyeron en 0.09Hz, 0.14Hz y 1.1Hz respectivamente. Por último, de acuerdo a los resultados obtenidos los modos superiores son los que disminuyen en mayor medida.

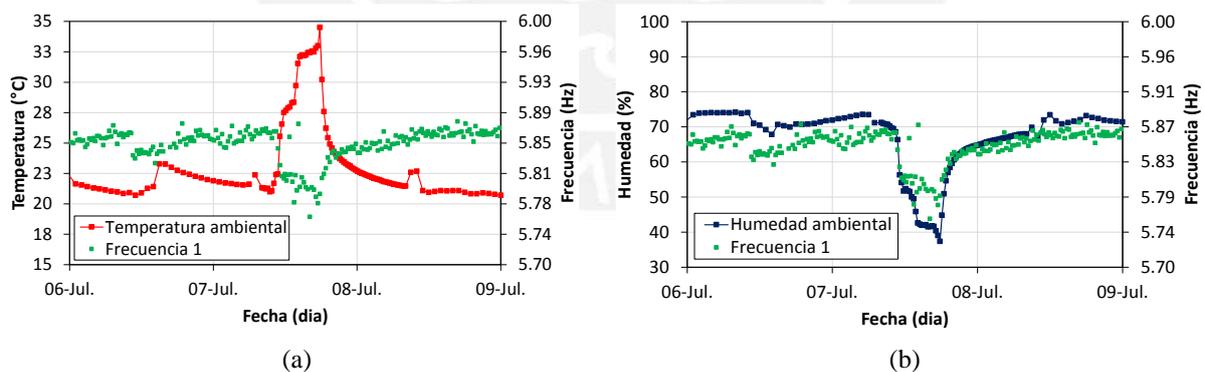


Figura 4.13 Variación de frecuencia 1 por incremento inducido de temperatura (a) Incremento de temperatura ambiente (b) Disminución de humedad relativa.

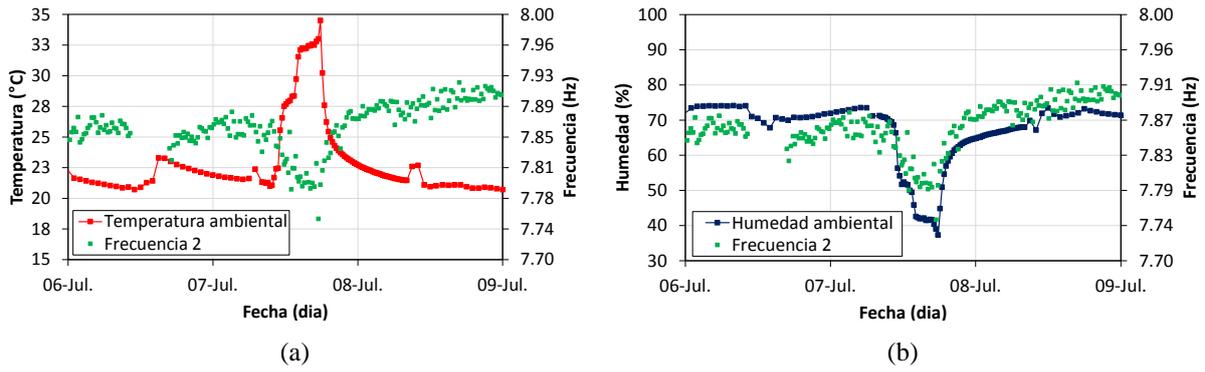


Figura 4.14 Variación de frecuencia 2 por incremento inducido de temperatura (a) Incremento de temperatura ambiente (b) Disminución de humedad relativa.

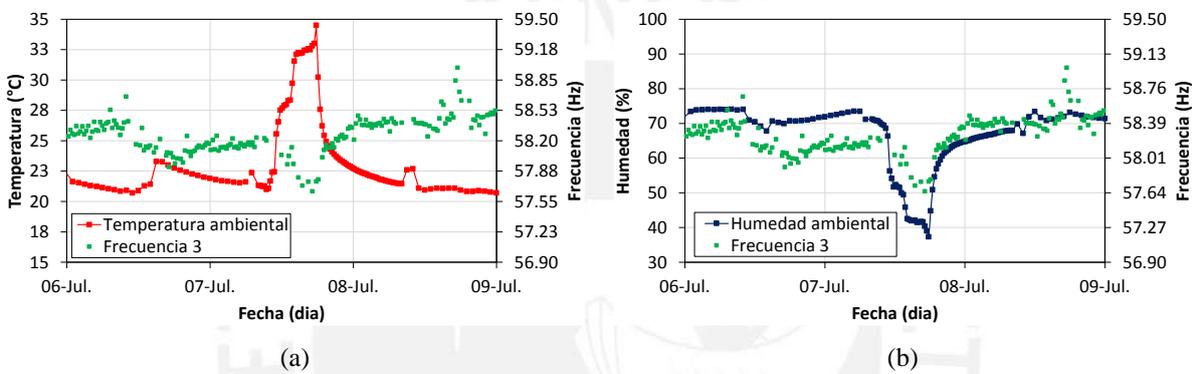


Figura 4.15 Variación de frecuencia 3 por incremento inducido de temperatura (a) Incremento de temperatura ambiente (b) Disminución de humedad relativa.

Capítulo 5

Monitoreo dinámico y ambiental de muros de adobe

Resumen

Los avances en el campo del monitoreo de salud estructural han permitido una fácil instalación de sistemas de monitoreo estructural cada vez más complejos, capaces de proporcionar y manipular enormes cantidades de datos medidos continuamente (Morrison, 2008). Un sistema de monitoreo completo requiere del conocimiento de los factores ambientales y de la respuesta estructural a lo largo de toda la vida útil de las estructuras. Estos sistemas proporcionan constantemente registros de acelerómetros y sensores ambientales mediante sistemas de adquisición cada vez más sofisticados. Los datos son procesados por una variedad de métodos y luego son analizados obteniendo correlaciones estadísticas entre las variables ambientales y las propiedades dinámicas para poder determinar posibles daños estructurales. En la presente investigación se generaron modelos autoregresivos (ARX) y modelos multiparamétricos lineales (MLRM) con el fin de correlacionar las propiedades dinámicas y los factores ambientales en sistemas estructurales de tierra.

5.1 Introducción

En la actualidad existen numerosas investigaciones en el campo del monitoreo de la salud estructural de construcciones modernas y a la vez día a día se generan numerosos datos (parámetros ambientales, registros de aceleración, registros sísmicos, etc). Sin embargo, no existen muchos casos de estudio de construcciones históricas y del material tierra siendo monitoreados en tiempo real. Adicionalmente en el estudio de construcciones patrimoniales existe la principal dificultad de poder obtener muestras del material que la componen, por lo que en la mayoría de casos se hace difícil la obtención de datos al interior de estas estructuras. De la misma manera no existen datos de especímenes de tierra instrumentados para el monitoreo continuo de propiedades dinámicas ni de factores ambientales, es debido a esto la necesidad de realizar pruebas de laboratorio preliminares que incluyan el monitoreo continuo y automatizado por varios meses, inclusive años.

Con el fin de estudiar los efectos de los cambios de temperatura y humedad en las frecuencias naturales de estructuras de tierra, la presente investigación se centra en el monitoreo continuo de las propiedades dinámicas y los factores ambientales de tres muros de adobe de diferentes espesores. Para lo cual se construyeron tres muros de adobe que repliquen las características del material y la forma geométrica de los muros existentes en el Complejo arqueológico Huaca de La Luna (Trujillo-Perú). De esta manera se tienen especímenes parecidos a los originales y la facilidad de obtener datos que se aproximen más a la realidad.

El Complejo Arqueológico Huaca de La Luna se encuentra ubicado en la costa norte del Perú (Trujillo-Perú) y fue construido entre los años 100 y 650 D.C por la cultura Moche. Es considerado un centro político y ceremonial de la antigua sociedad Moche y muy conocido por la técnica constructiva de superposición de templos en diferentes periodos (Uceda & Morales, 2010). En la Figura 5.1a se observa un modelo sólido 3D del Complejo arqueológico Huaca de la Luna la cual está formada por tres plataformas principales y cuatro plazas de mampostería de adobe y mortero de barro (Zvietcovich, 2015). De la misma manera en la Figura 5.1b se muestra la ubicación de las cuatro zonas importantes del complejo: 1) altar, 2) fachada decorada, 3) unidad 16 y 4) salón hipóstilo.



Figura 5.1 Complejo arqueológico Huaca de La Luna (a) El monumento se localiza al pie del cerro blanco en la ciudad de Trujillo - Perú (b) Estructura interna de Huaca de La Luna. Adaptado de (Zvietcovich et al., 2015).

5.2 Monitoreo de factores ambientales en unidades de adobe

En este acápite se ha evaluado el tiempo de secado en tres unidades de adobe instrumentados con sensores de temperatura (LM-35) y sensores de humedad (FC-28) los cuales están expuestos al medio ambiente durante varios meses. Para lograr tal fin primero se ha estudiado la caracterización de materiales mediante ensayos de laboratorio, luego se continuó con el proceso de fabricación de unidades de adobe y la instrumentación de estos con sensores de temperatura y humedad, y finalmente se realizó la discusión e interpretación de resultados.

5.2.1 Caracterización de materiales

El objetivo primordial es la fabricación de unidades de adobe que tengan propiedades semejantes al de los empleados en el Complejo arqueológico Huaca de La Luna. Para lo cual primero se revisó los resultados de los trabajos realizados en unidades de adobe en esta zona arqueológica. El tipo de material empleado en la fabricación de los adobes de Huaca de La Luna corresponde a un suelo areno arcilloso que presenta 85% de arena y un 15% de finos (PHLL, 2008). Los adobes de Huaca presentan gran irregularidad en su forma geométrica, por lo que Montesinos (2016) realizó un proceso de medición con cinta métrica de 80 unidades originales y uniformizó las dimensiones a un promedio de $320 \times 220 \times 120 \text{ mm}^3$. Por lo que se tomaron estas medidas como dimensiones de las unidades de adobe fabricadas en la campaña experimental. En la Figura 5.2a y 5.2b se muestran las unidades originales de Huaca y las fabricadas en el mes de Julio del 2016 respectivamente. De la misma manera se llevaron a cabo ensayos en el laboratorio de Mecánica de suelos de la PUCP para obtener la curva granulométrica y los límites de Atterberg del suelo empleado. En la Figura 5.2c se muestra la comparación de las curvas granulométricas y se ve que existe una gran aproximación en los tamaños de las partículas con respecto a los empleados en Huaca.

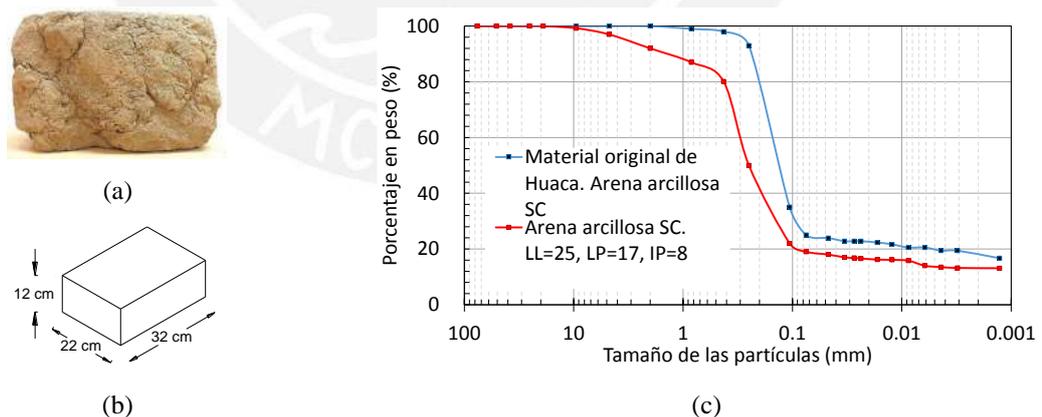


Figura 5.2 Forma geométrica y tipo de material de los adobes (a) unidad original de Huaca (b) unidad fabricada (c) Comparación de curvas granulométricas.

5.2.2 Elaboración de unidades de adobe

Los bloques de adobe fueron construidos para medir las condiciones ambientales internas y externas (temperatura y humedad) a partir de un estado húmedo (fabricación) hasta su posterior secado. Estos fueron construidos y colocados al lado de los muros de adobe y

reflejan el efecto de la temperatura del aire y la humedad relativa en el proceso de secado. La campaña experimental inició con la elaboración de más de 500 unidades de adobes el 12 de Julio del 2016 los cuales sirvieron para la posterior construcción de los tres muros de adobe.

Según el (MVCS, 2010) la gradación del suelo debe aproximarse a los siguientes porcentajes: arcilla 10-20%, limo 15-25% y arena 55-70% para conseguir unidades de adobe resistentes y no se debe utilizar suelos orgánicos. Sin embargo la proporción utilizada fue de 5:4:1 en volumen (suelo, arena gruesa y paja), esto debido a que se logró que el material sea idéntico al utilizado en la Huaca de La Luna y siempre se tuvo en cuenta las recomendaciones de la Norma E.080 (SENCICO, 2000).

En el proceso de elaboración primero se tuvo que cernir la tierra para separar la parte fina del material grueso y así la mezcla pueda ser más trabajable y conseguir unidades uniformes, luego se tuvo que humedecer el suelo y realizar un mezclado mecánico junto con la arena gruesa, paja y agua. Según recomendaciones del (MVCS, 2010) se agregó paja para evitar que los adobes se agrieten al secar. En seguida se lanza con fuerza varias porciones de mezcla a un molde que tiene las dimensiones requeridas ($320 \times 220 \times 120 \text{mm}^3$) y se debe tener en cuenta que el molde debe estar rociado de arena fina para que los adobes no se peguen. El barro debe estar al ras del molde y siempre se tiene que emparejar la superficie usando una regla. Finalmente se retira el molde y se va colocando uno por uno los adobes en una superficie plana cuidando que no se deformen, posteriormente tener en cuenta que los adobes se rajan con el sol, por lo cual se debe cubrir el ambiente en donde permanecerán secando por un periodo de 6 a 7 semanas. En la Figura 5.3 se muestra el procedimiento para la fabricación de adobes.



Figura 5.3 Proceso constructivo de unidades de adobes (a) cernir la tierra (b) humedecer la tierra (c) mezclado mecánico (d) enrazado de adobes (e) colocación de adobes (f) apilado de adobes.

5.2.3 Instrumentación de unidades de adobe

Como mencionamos en la introducción nuestro objetivo es evaluar el tiempo de secado en unidades de adobe mediante el monitoreo continuo y totalmente automatizado utilizando sensores de temperatura y humedad. Por lo que durante la producción de unidades de adobe se instrumentaron 3 de estos y se introdujeron un sensor de temperatura (LM-35) y un sensor de humedad (FC-28) por cada unidad. El proceso de instrumentación se puede apreciar en la Figura 5.4.

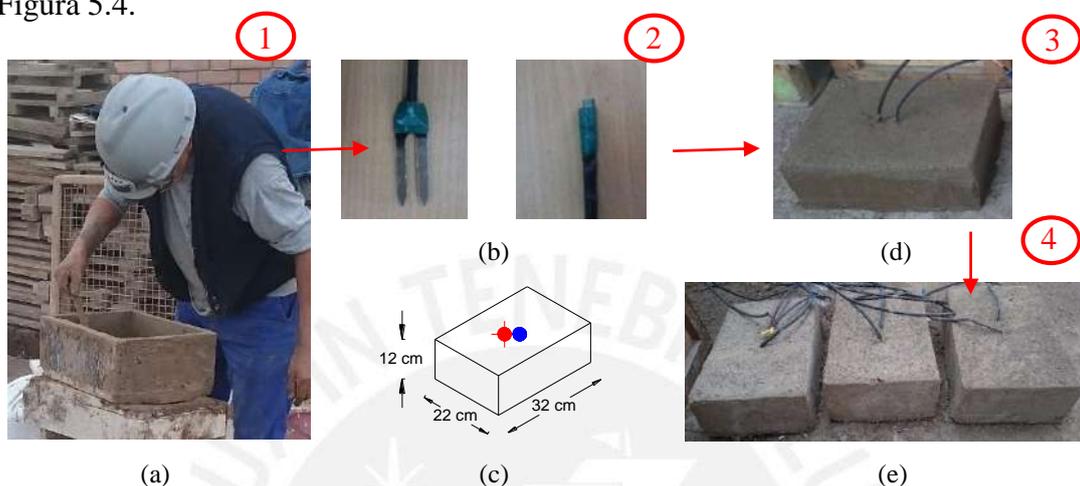


Figura 5.4 Proceso de instrumentación de unidades de adobes (a) Colocación de la mezcla de tierra al molde (b) Sensor de humedad FC-28 y de temperatura LM-35 (c) Detalle de ubicación de sensores (d) Adobe instrumentado (e) Adobes secos.

En total se utilizaron 6 sensores ambientales para medir la temperatura y la humedad interna de los adobes fabricados y en el Capítulo 3 se describe a detalle como ensamblarlos. Se utilizó un sistema de adquisición de datos DAQ USB-6003 de 8 canales y se midió el voltaje de salida para cada sensor y mediante la fórmula descrita en el Capítulo 3 se obtuvieron la temperatura y la humedad interna. Se configuró el tiempo de muestreo de una muestra por cada hora para evitar problemas de calentamiento del sensor. Por otra parte la temperatura del aire y la humedad relativa del ambiente fueron registradas con el sensor ambiental UX100-011.

5.2.4 Resultados y discusión

En los tres primeros días de medición la humedad interna estuvo oscilando entre valores de 75% y 85% para los tres bloques de adobe, es decir no había una estabilidad en los valores (ver Figura 5.5). Conforme pasaron los días la humedad fue teniendo un comportamiento estable en un valor promedio de 82% para el bloque #1, 80% para el bloque #2 y 80% para el bloque #3. Luego de 6 a 7 semanas la humedad interna de los adobes fue disminuyendo hasta llegar a un valor promedio de 9%, lo que nos indica que los adobes están secos y listos para ser usados, por lo que se contrasta con la bibliografía (MVCS, 2010) la cual nos sugiere que el tiempo de secado está entre 6 a 7 semanas. A partir del segundo mes (Setiembre, 2016) hasta el final del monitoreo (Febrero, 2017) la humedad interna se mantuvo en un valor constante y a diferencia de las probetas de tierra (Capítulo 3), se nota cómo influye drásticamente las condiciones ambientales en el proceso de secado. En la Tabla 5.1 se muestra un resumen de los valores de humedad interna y externa de los bloques de adobe.

El día de fabricación de las unidades de adobe la temperatura interna para el bloque #1 fue 22.7°C, para el bloque #2 de 22.5°C y el bloque #3 de 22.2°C, en promedio estos valores están por debajo de 2°C a 3°C de la temperatura externa, esto se entiende ya que la mezcla estaba húmeda y conforme fueron transcurriendo los días la temperatura se fue igualando a la temperatura del medio ambiente consiguiendo un equilibrio térmico. De la misma manera se ve la influencia del cambio de estación de invierno a verano ya que la temperatura interna de las unidades de adobe se incrementa hasta llegar a un valor considerable de 35°C. Teniendo las condiciones ambientales controladas y estudiadas ya se puede entender mucho mejor el proceso de secado de unidades de tierra y poder extrapolar las ideas a estructuras más complejas.

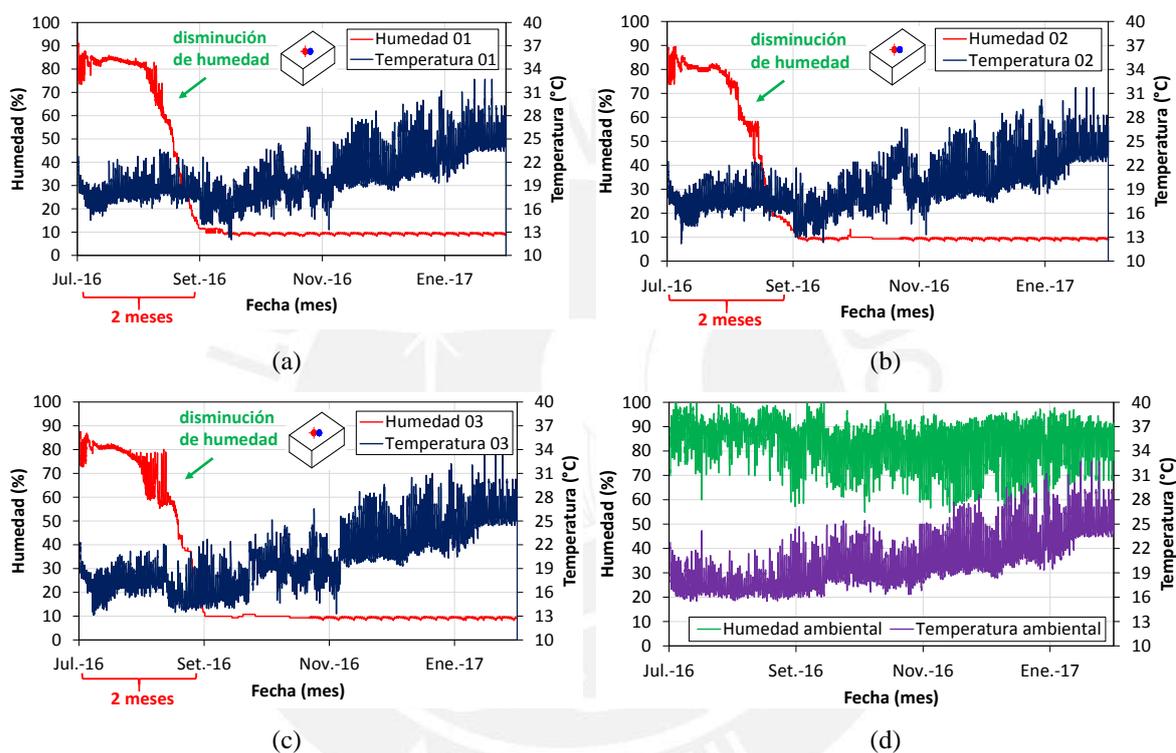


Figura 5.5 Registros de temperatura y humedad en bloques de adobe (a) Al interior de adobe #1 (b) Al interior de adobe #2 (c) Al interior de adobe #3 (d) En el medio ambiente.

En la Tabla 5.1 se muestra un resumen de los valores de temperatura interna y externa de los bloques de adobe.

Tabla 5.1 Variación de humedad y temperatura al interior de los bloques de adobe.

	Humedad (%)			Temperatura (°C)		
	Inicial	Final	Variación	Inicial	Final	Variación
Bloque de adobe 1	90	9	81	22.7	30.0	7.3
Bloque de adobe 2	88	10	78	22.5	28.9	6.4
Bloque de adobe 3	89	9	80	22.2	29.1	6.9
Ambiente	70	61	9	24.9	30.0	5.1

5.3 Monitoreo continuo de tres muros de adobe

Luego del proceso de fabricación de bloques de adobes y su posterior secado por un periodo de 7 semanas aproximadamente, fueron construidos tres muros de adobe a escala real ubicados en el laboratorio de estructuras de la PUCP. Estos muros fueron construidos con el fin de monitorear las propiedades dinámicas y factores ambientales bajo condiciones reales ya que estarán expuestos al medio ambiente por más de 6 meses. Las dimensiones de cada muro se muestran en la Figura 5.6 y presentan espesores variables de 0.22m, 0.56m y 0.80m ya que se requiere evaluar diversas tipologías.

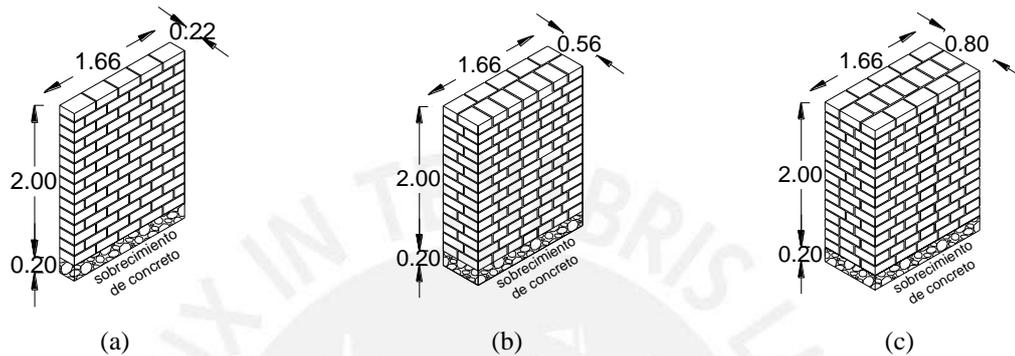


Figura 5.6 Tipos de muros de adobe (dimensiones en m) (a) Muro tipo I de 0.22 m de espesor (b) Muro tipo II de 0.56 m de espesor (c) Muro tipo III de 0.8 m de espesor.

Se estudiaron diversas tipologías de muros (alturas, espesores, tipos de amarre) pertenecientes a la Unidad 16 del Complejo arqueológico Huaca de La Luna (Figura 5.7a). De los cuales se replicaron las características geométricas y del material de dos muros de adobe de espesores 0.56m y 0.80m, los cuales se muestran en la Figura 5.7c y Figura 5.7d respectivamente.

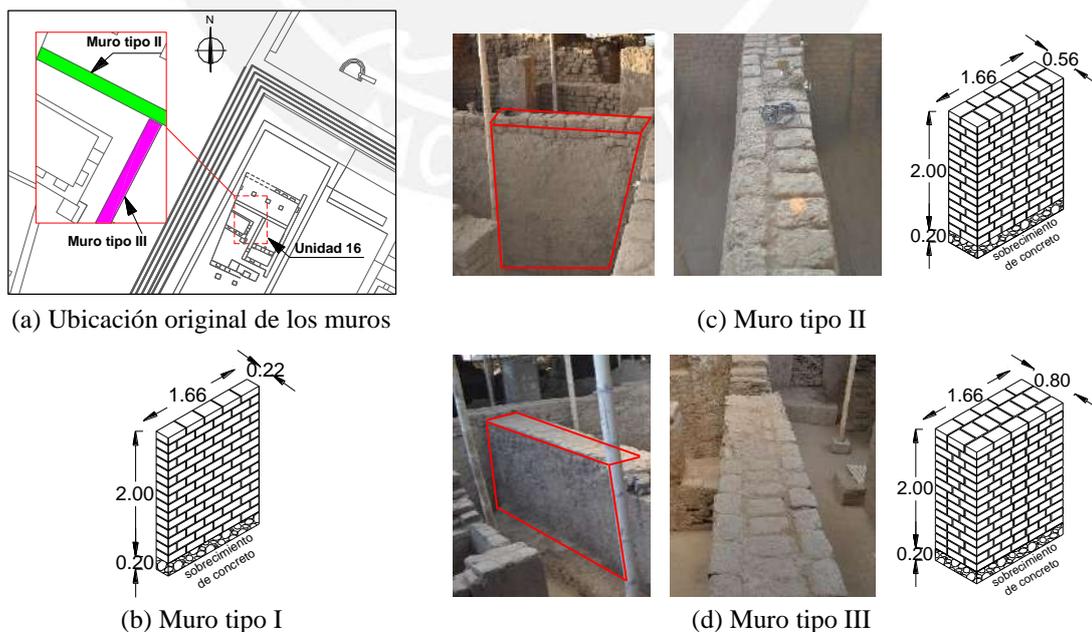


Figure 5.7. Ubicación y tipos de muros (dimensiones en m) (a) Ubicación de muros originales (b) Muro de 0.22m de espesor (c) Muro de 0.56m de espesor (d) Muro de 0.80m de espesor.

5.3.1 Proceso constructivo de muros de adobe

Una vez que las unidades de adobe se encontraron totalmente secos y el sistema de monitoreo dinámico y ambiental en funcionamiento y totalmente operativo, se procedió a construir tres muros de adobe en setiembre del 2016. El proceso constructivo se muestra en las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10 para los tres muros respectivamente. En primer lugar se construyó las bases de la cimentación a base de concreto ciclópeo con el fin de evitar la filtración de humedad a través del suelo. El proceso constructivo consistió en ir asentando los adobes en diferentes etapas ya que no se puede construir todo un muro completo el mismo día, esto debido a que por su propio peso las juntas en la parte inferior se deformarían y el muro perdería verticalidad y la geometría requerida. El proceso constructivo se llevó a cabo en 4 días: el primer día se construyó las 2 primeras mitades de los muros tipo I y II y la primera hilada del muro tipo III, el segundo día se construyó la mitad del muro tipo III y se terminó de construir el muro tipo I, el tercer día se terminó de construir el muro tipo III y el último día se terminó con el muro tipo II. Conforme se fueron construyendo los muros se colocó el sistema de monitoreo ambiental incrustando los sensores de temperatura y humedad al interior y en las juntas de los muros. Luego de 2 días de terminar la construcción se colocó el sistema de monitoreo dinámico utilizando sensores de aceleración y estos fueron cubiertos y protegidos con techos de plástico para evitar que se oxiden con la lluvia y que se produzca algún tipo de ruido que afecte a las mediciones. De la misma manera se pintaron las caras opuestas de los muros en la orientación Este-Oeste con un material impermeabilizante “alquitrán” para evitar que el flujo de calor pase en esta dirección.



Figura 5.8 Proceso constructivo muro tipo I (a) Sobrecimiento de concreto (b) Colocación de adobes en la base (c) Colocación de sensores (d) Muro a la mitad (e) Continuación del muro (f) Muro terminado.



Figura 5.9 Proceso constructivo muro tipo II (a) Sobrecimiento de concreto (b) Colocación de adobes en la base (c) Colocación de sensores (d) Muro a la mitad (e) Continuación del muro (f) Muro terminado.



Figura 5.10 Proceso constructivo muro tipo III (a) Sobrecimiento de concreto (b) Colocación de adobes en la base (c) Colocación de sensores (d) Muro a la mitad (e) Continuación del muro (f) Muro terminado.

5.3.2 Descripción de sensores y sistemas de adquisición de datos

El sistema de monitoreo ambiental está diseñado para medir la temperatura y humedad interna y externa de los muros de adobe. Los datos de temperatura interna fueron recolectados a través de sensores tipo LM-35 y la humedad interna del tipo FC-28. El rango de medición es de -55°C - 150°C para los de temperatura y de 5% - 95% para los de humedad. Se utilizó un sensor integrado digital UX100-011 HOB0 para medir la temperatura y la humedad del aire, con un rango de medición de -55°C - 150°C para la temperatura y 0% - 99% para la humedad relativa. Los sensores LM-35 y FC-28 se conectaron a dos dispositivos de adquisición de datos NI USB 6225 (80 canales) y NI USB 6003 (8 canales). Los datos de los sensores ambientales internos y externos fueron programados para adquirir una muestra por cada hora. En el Capítulo 3 se describe con mayor detalle la descripción de los sensores y los equipos de adquisición.

El sistema de monitoreo dinámico fue llevado a cabo colocando acelerómetros uni-axiales modelo PCB 393B12 con sensibilidad de 10 V/g y rango de frecuencia de 0,15-1000 Hz, este sensor incluye una cubierta térmica para la protección de factores externos. Las bases magnéticas de los acelerómetros se fijan en la superficie de los muros de adobe mediante bases de acero. Los acelerómetros se conectaron a dos sistemas de adquisición multicanal cDAQ-9234 (resolución de 24 bits y rango dinámico de 102 dB). Con el fin de poder garantizar una autonomía energética en el caso que se dé un corte de energía, los sistemas de adquisición fueron conectados a una batería de 12V y a un mantenedor de carga. El sistema de adquisición fue programado para adquirir paquetes de datos de 10 minutos por cada hora considerando una frecuencia de muestreo de 256 Hz. En el Capítulo 4 se describe con mayor detalle la descripción de los sensores y los equipos de adquisición

Para la toma de datos se utilizaron rutinas creadas en el entorno de programación LabView (LabView, 2015) el cual es compatible con los sistemas de adquisición de datos de National Instruments. En la Figura 5.11 se muestra una captura de pantalla del panel frontal de los programas creados para el monitoreo dinámico y ambiental. Una de las principales características de estos programas es su total autonomía en la toma de datos durante todo el tiempo que se requiera (días, semanas, meses, etc) y tienen a disposición del usuario elegir el tiempo y la frecuencia de muestreo.

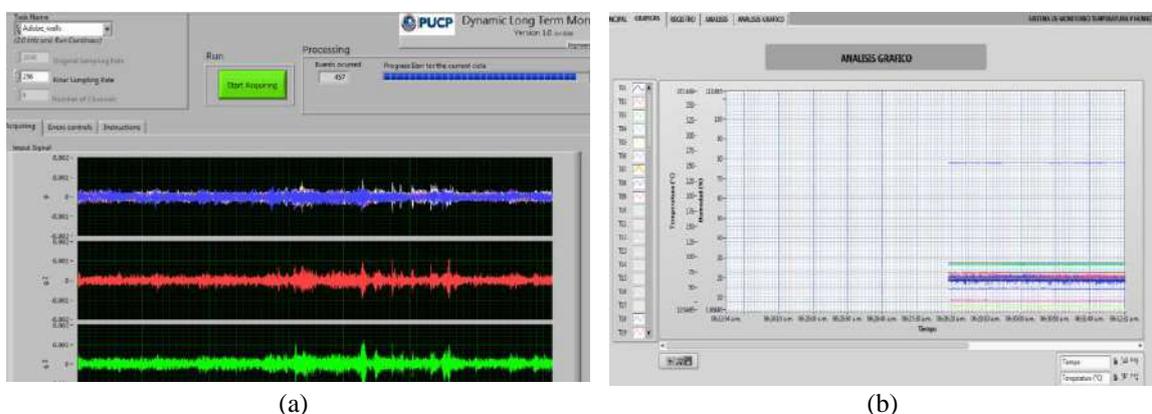


Figura 5.11 Panel frontal VI de los programas desarrollados para el monitoreo (a) dinámico (b) ambiental.

5.3.3 Instrumentación de muros de adobe

Con el fin de monitorear la temperatura y la humedad dentro de tres muros de adobe, se colocaron sensores al interior de cuatro secciones transversales en la parte superior, media, inferior y en contacto con la cimentación. Estos se colocaron con el fin de determinar el gradiente de temperatura y humedad en los cuatro planos de los muros. En las Figuras 5.12 a 5.14 se muestran esquemas específicos de la ubicación de los sensores de humedad y temperatura al interior de los muros tipo I, II y III respectivamente. De la misma manera se colocó un sensor ambiental mediante una banda de sujeción al lado de los muros de adobe para controlar la temperatura y la humedad ambiente. Con el fin de representar una mejor distribución de las condiciones ambientales se densificó el número de sensores de temperatura y humedad: 31 fueron sensores de temperatura (30 sensores embebidos y 1 sensor de temperatura del aire) y 52 sensores de humedad (51 sensores embebidos y 1 sensor de humedad del aire).

De la misma manera la disposición de los sensores de aceleración se muestra en las Figuras 5.12 a 5.14 para cada tipo de muro y nos permite observar los modos de flexión en las dos direcciones ortogonales y los modos de torsión. En total se colocaron 8 acelerómetros (tres para el muro tipo I, dos para el tipo II y tres para el tipo III). Los dos sistemas de monitoreo dinámico y ambiental se encuentran instalados desde setiembre de 2016.

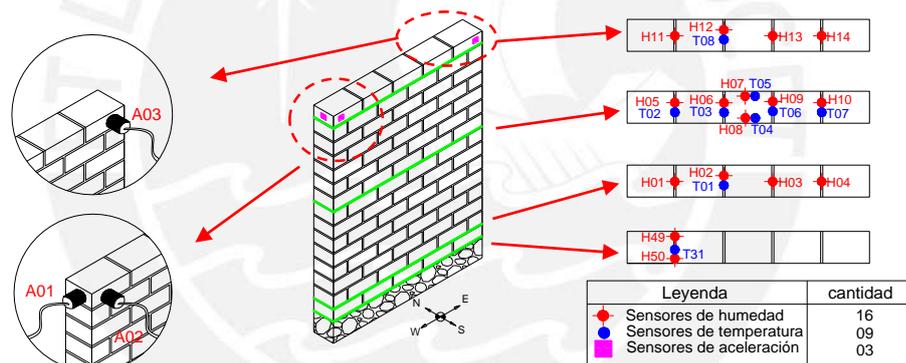


Figure 5.12 Esquema de la instrumentación del muro tipo I (A, H, T denotan los sensores de aceleración, humedad y temperatura respectivamente).

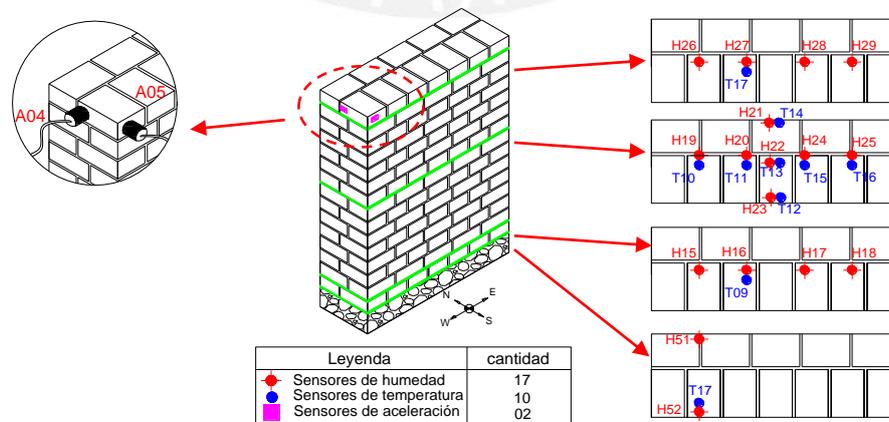


Figure 5.13 Esquema de la instrumentación del muro tipo II (A, H, T denotan los sensores de aceleración, humedad y temperatura respectivamente).

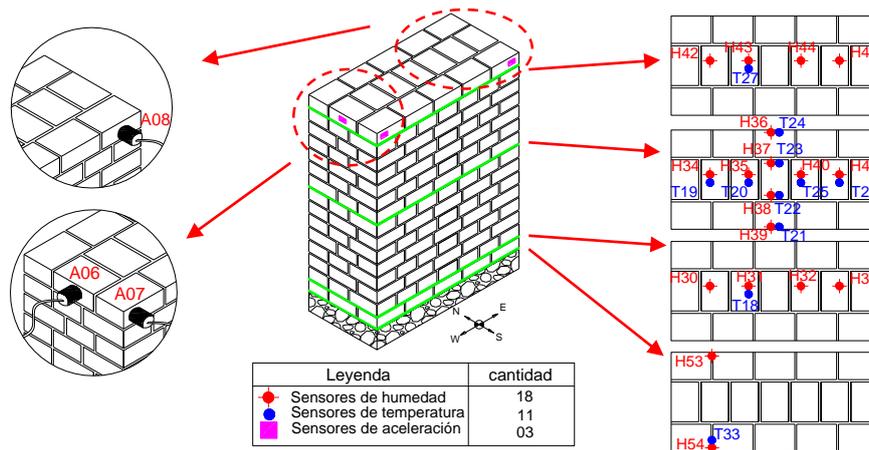


Figure 5.14 Esquema de la instrumentación del muro tipo III (A, H, T denotan los sensores de aceleración, humedad y temperatura respectivamente).

En la Figura 5.15 se muestra los tres muros de adobe construidos y el centro de monitoreo instalado, el cual está operativo las 24 horas del día y los 365 días del año. Los datos de parámetros dinámicos y de factores ambientales son recogidos día a día y luego procesados.



Figura 5.15 Lugar de emplazamiento y centro de monitoreo continuo de tres muros de adobe.

En la Figura 5.16 se muestra a detalle el centro de monitoreo dinámico y ambiental el cual está al interior de una caja de madera cubierto con plástico y colocado en un lugar seguro. En la caja de monitoreo se puede encontrar los respectivos sistemas de adquisición, baterías, mantenedor de carga, computadora portátil, cableado, cargador, alimentador de energía, etc.



Figura 5.16 Centro de monitoreo continuo (a) dinámico (b) ambiental.

5.4 Análisis e interpretación de resultados

5.4.1 Identificación modal automática

El sistema de monitoreo dinámico empezó a adquirir continuamente series de tiempo de aceleración a partir de setiembre del 2016 los cuales fueron procesadas para obtener las frecuencias de vibración para cada muro de adobe. Los datos de aceleración fueron obtenidas a través del método SSI-Data con un tiempo de 10 minutos por cada hora y una frecuencia de muestreo de 256 Hz. Durante el período de medición hubo algunas interrupciones debido a errores en el sistema de adquisición, falta de energía eléctrica, problemas con la rutina, etc, sin embargo estos problemas fueron superados y hasta la fecha se tiene buenos resultados. La Figura 5.17 muestra los resultados de las primeras cuatro frecuencias identificadas para cada muro de adobe. De acuerdo a los resultados obtenidos todas las frecuencias de los 3 muros fueron incrementando a partir del día de la construcción hasta los dos primeros meses aproximadamente y luego fueron estabilizándose. Este incremento corresponde al endurecimiento de los muros debido al efecto de secado de las juntas y de esta manera al pasar el tiempo llegaron a adquirir mayor rigidez. En la Figura 5.17 se muestra la variación final de las frecuencias desde la construcción hasta que las frecuencias se estabilizan.

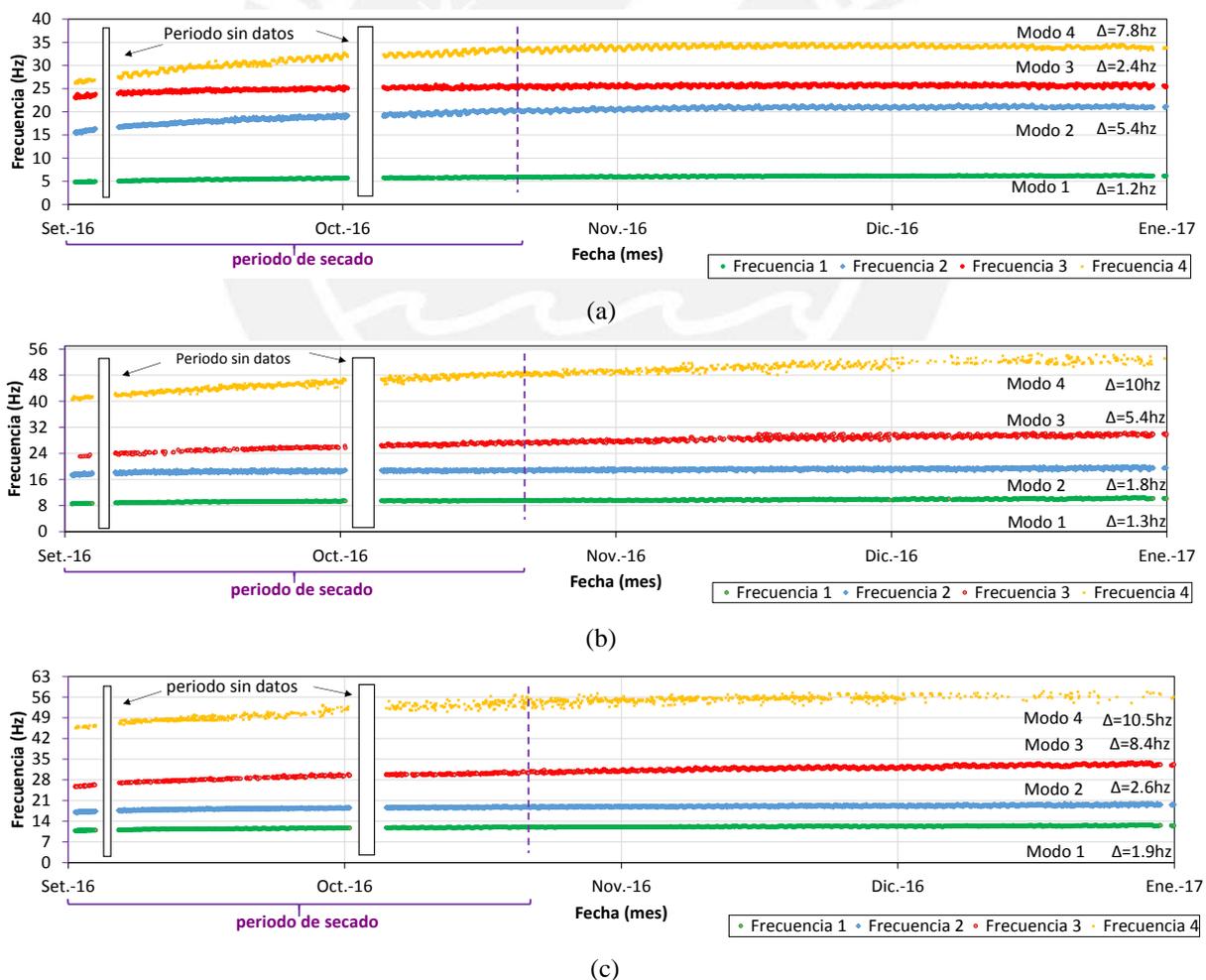


Figura 5.17 Frecuencias naturales identificadas para los tres muros de adobe (a) Muro tipo I (b) Muro tipo II (c) Muro tipo III.

Las formas de modo obtenidas para cada muro de adobe juegan un papel muy importante en el comportamiento dinámico y en la variación de las frecuencias ya que con la identificación modal automática se pudo obtener diversas particularidades. Para el muro tipo I la primera frecuencia corresponde a un modo traslacional, la segunda es un modo torsional, la tercera es traslacional en la otra dirección y la cuarta frecuencia es un modo flexural. Para el muro tipo II las dos primeras frecuencias corresponden a las formas de modo traslacional, la tercera y la cuarta son torsional y flexural respectivamente. Para el muro tipo III al igual que el muro tipo II las dos primeras frecuencias son modos traslacionales, la tercera es un modo torsional y la cuarta un modo flexural. En la Tabla 5.2 se muestra un resumen de la variación de frecuencias a partir del día de la construcción hasta que terminó el proceso de secado. Para el muro tipo I la primera frecuencia varía en un 15.8%, la segunda frecuencia en 20.5% que es la torsional, la tercera frecuencia varía en un 8.2% y la cuarta en 19.2%. Para el muro tipo II la primera frecuencia varía en un 10.3 %, la segunda frecuencia en 7.2%, la tercera frecuencia varía en un 13.0% que es la torsional y la cuarta en 14.5%. Para el muro tipo III la primera frecuencia varía en un 8.8%, la segunda frecuencia en 7.7%, la tercera frecuencia varía en un 14.1% que es la torsional y la cuarta en 15.2%. En conclusión para los tres muros los modos laterales son los que tienen poca variación bajo el efecto del secado. El caso contrario ocurre en los modos superiores, ya que para el muro tipo I, II y III el efecto del secado produce mayor variación en el modo torsional y flexural.

Tabla 5.2 Variación de frecuencias durante el proceso de secado de los muros de adobe.

	Frecuencia 1 (Hz)			Frecuencia 2 (Hz)			Frecuencia 3 (Hz)			Frecuencia 4 (Hz)		
	inicial	final	Δ (%)									
muro tipo I	4.8	5.7	15.8	15.5	19.5	20.5	23.1	25.2	8.2	26.2	32.4	19.2
muro tipo II	8.4	9.4	10.3	17.3	18.6	7.2	23.1	26.5	13.0	40.5	47.4	14.5
muro tipo III	10.7	11.8	8.8	17.1	18.5	7.7	25.6	29.8	14.1	45.6	53.8	15.2

Por otro lado si se coloca las frecuencias de la Figura 5.17 a una escala más grande se comprueba que las variaciones diarias de temperatura y humedad son claramente visibles y afectan a todas las frecuencias modales. Lo anterior se corrobora ya que existe una fluctuación de las frecuencias producto de las subidas y bajadas de la temperatura durante cada día teniendo en cuenta que en algunos modos son más visibles que otros. Este análisis de correlación entre los parámetros dinámicos y ambientales se verá con mayor detalle en el acápite 5.5.

5.4.2 Análisis modal de los muros de adobe

Se creó un modelo numérico de los muros de adobe en SAP2000 (2005) para realizar un análisis modal y se obtuvieron las cuatro primeras frecuencias de vibración y formas modales las cuales se muestran en la Figura 5.18. El objetivo de estas pruebas fue obtener las formas de vibrar y frecuencias a partir de un modelo numérico para de esta manera corroborar los resultados obtenidos con la identificación automática de manera experimental. De la misma manera en la Figura 5.18 se puede observar claramente cómo cambian las formas de modo para cada tipo de muro con respecto a los ejes de coordenadas X e Y.

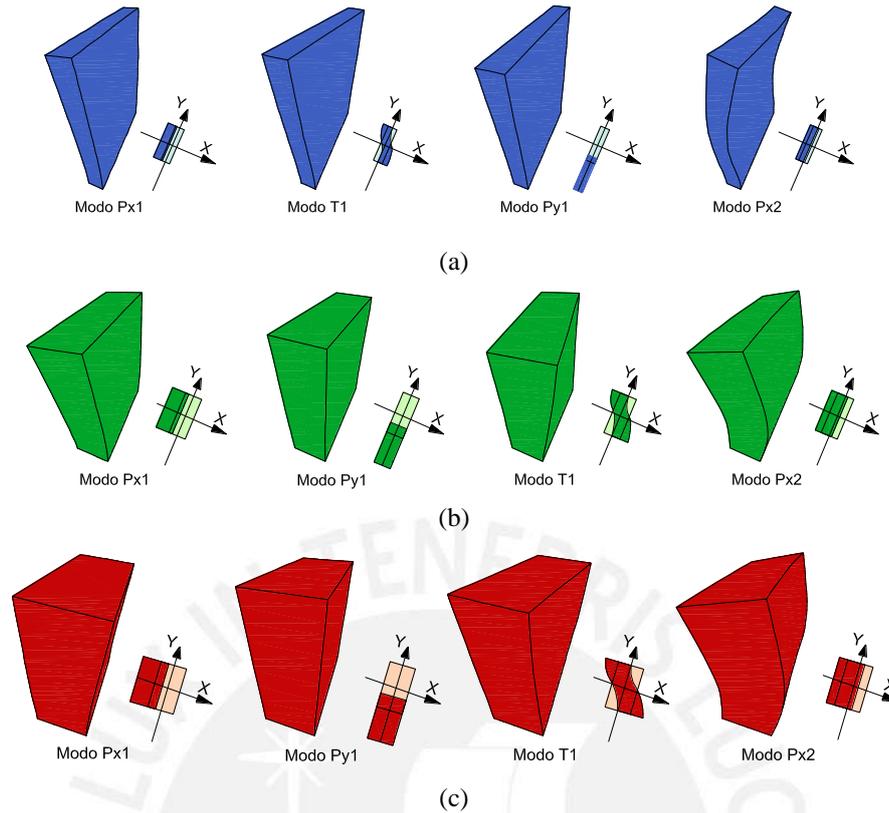


Figura 5.18 Formas de modos de tres muros de adobe (a) Muro tipo I (b) Muro tipo II (c) Muro tipo III.

En la Tabla 5.3 se resumen los parámetros dinámicos encontrados. Los modos laterales o traslacionales se denotan como Px y Py teniendo como referencia los ejes de coordenadas X e Y mostrados en la Figura 5.18 y T1 representa el modo torsional. Las frecuencias obtenidas con el modelo numérico son similares a las obtenidas con la identificación dinámica automática.

Tabla 5.3 Parámetros modales identificados mediante el análisis modal en SAP 2000.

Muro tipo I			Muro tipo II			Muro tipo III		
Número de modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo	Número de modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo	Número de modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	6.2	Px1	1	10.2	Px1	1	12.7	Px1
2	21.2	T1	2	19.4	Py1	2	19.7	Py1
3	25.6	Py1	3	29.6	T1	3	34.0	T1
4	34.0	Px2	4	53.0	Px2	4	56.1	Px2

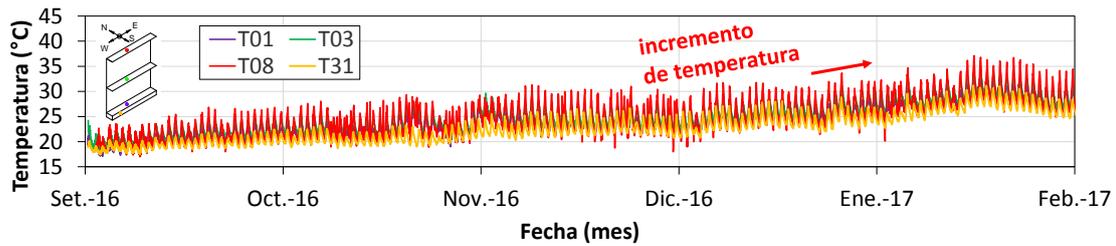
5.4.3 Identificación automática de factores ambientales

Bajo la influencia de la temperatura y la humedad del aire, la radiación solar y la inercia térmica de las construcciones de tierra, la distribución de la temperatura y la humedad en los muros de adobe son usualmente no uniformes y dependientes del tiempo. Se midió la temperatura y humedad tanto externa como interna en los tres muros de adobe a partir de los sensores ambientales y embebidos respectivamente. En el caso de los sensores externos se colocó un sensor que nos permita medir la temperatura y humedad ambiental al cual estarán expuestos los muros. En el caso de los sensores internos se colocaron en la parte superior,

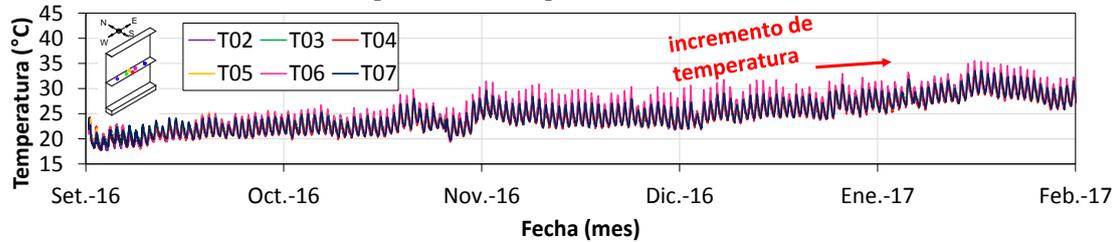
media, baja y cimentación de los tres muros de adobe. De la gran cantidad de sensores colocados se realizó un estudio minucioso y se obtuvo resultados particulares para cada muro los cuales se detallan a continuación.

La Figura 5.19 muestra la variación de temperatura y humedad interna para el muro tipo I. En la Figura 5.19a se puede apreciar el análisis desarrollado en la sección vertical a lo alto del muro e incluida el contacto con la cimentación. Los sensores de temperatura siguen el comportamiento del cambio de estación de invierno, primavera y verano con una temperatura inicial de 16°C hasta llegar a una temperatura máxima en el verano de 36°C. De la misma manera se muestra que bajo la influencia de la radiación solar y la inercia térmica de las construcciones de tierra, la distribución de la temperatura es usualmente no uniforme y dependiente del tiempo. Por otro lado el sensor de temperatura ubicado en la parte superior del muro recibe luz solar directa, por lo tanto su temperatura es la más alta que las demás secciones. En la Figura 5.19b se muestra los resultados de los sensores de temperatura ubicados en la sección horizontal de la parte intermedia del muro tipo I. Se observa que los valores de temperatura son parecidos en tendencia y en magnitud, sin embargo en la zona central las temperaturas son más altas lo que demuestra que el muro se calienta. Esto se puede entender por el recorrido que realiza el sol de Este a Oeste durante cada día ya que empieza a calentar por los extremos y las máximas temperaturas se concentran alrededor del mediodía.

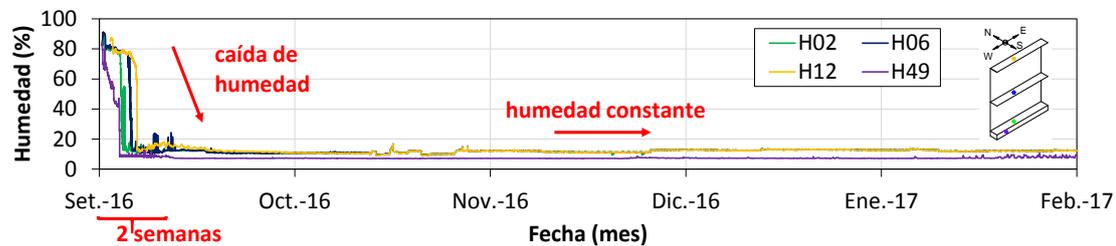
La Figura 5.19c muestra la variación de humedad interna a lo largo de toda la altura del muro y como se puede apreciar el día de construcción la humedad en todos los puntos estaba por encima de 90% el cual disminuyó presentando una caída de humedad que permaneció constante. Según los resultados de la humedad interna en las cuatro secciones se obtuvo que el valor promedio de la inferior, media y superior es de 11%, sin embargo en la cimentación se tiene un valor más bajo y está alrededor del 7% esto debido al contacto entre concreto y adobe. En conclusión existe un gradiente mínimo de humedad de 3% a lo largo de la sección vertical del muro. Por otro lado destacar que se consideró colocar la cimentación de concreto para evitar que no exista una filtración considerable a través del suelo y poder analizar solo efectos de humedad producto del medio ambiente. La Figura 5.19d muestra la variación de humedad interna en la sección horizontal de la parte intermedia del muro tipo I. Los cuatro sensores registraron una humedad de 90% el día de la construcción el cual fue disminuyendo por un periodo de 2 semanas hasta alcanzar un valor de 10% que permaneció constante hasta la fecha. En conclusión se demuestra que para el muro tipo I no existe un gradiente de humedad considerable entre las zonas inferior, intermedia y superior por lo que este efecto se puede despreciar.



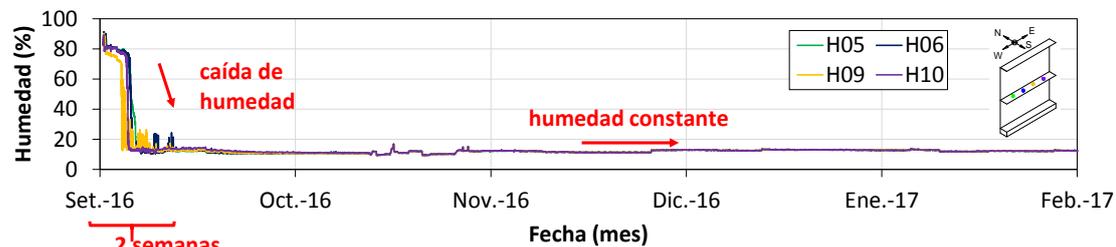
(a) Comparación de temperaturas internas en altura



(b) Comparación de temperaturas internas en la mitad



(c) Comparación de humedades internas en altura



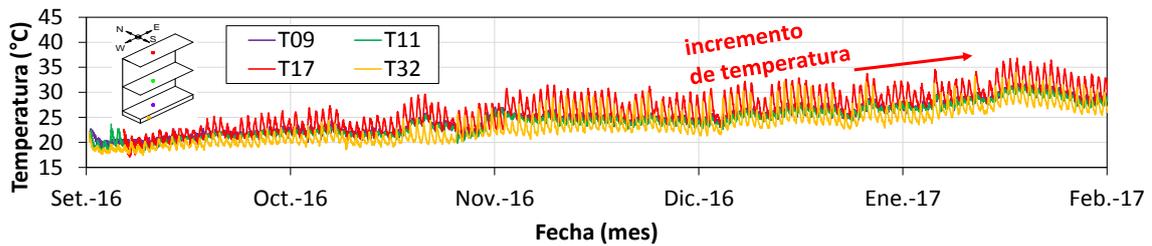
(d) Comparación de humedades internas en la mitad

Figure 5.19 Variación de temperatura y humedad en diferentes secciones transversales para el muro tipo I.

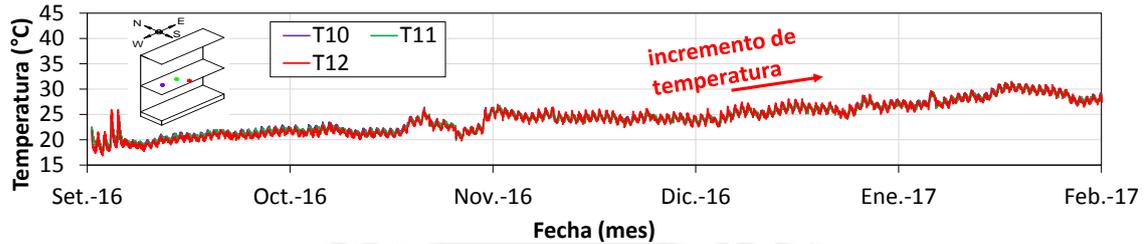
En la Figura 5.20 se observa un estudio intenso de la temperatura y humedad analizando diferentes secciones transversales para el muro tipo II. La Figura 5.20a muestra el análisis de la temperatura a lo alto del muro en el cual se aprecia un comportamiento obvio de la variación de la temperatura, la parte superior del muro recibe directamente los rayos solares por lo que las temperaturas son más altas que las otras secciones llegando a un valor máximo de 37°C . En la Figura 5.20b se observa que las temperaturas internas a media altura muestran un parecido en magnitud y tendencia obteniendo un valor mínimo de 17°C y un máximo de 31.5°C . De estos dos análisis previos se concluye que existe un mayor gradiente de temperatura en la dirección vertical que en la horizontal.

La Figura 5.20c muestra la variación de humedad interna en una sección transversal a lo alto del muro y como se puede apreciar la humedad en la cimentación es de 7% el cual es más bajo que las otras secciones que tienen un promedio de 13%. Por último en la Figura 5.20d se muestra el comportamiento constante de la humedad interna en la sección intermedia del

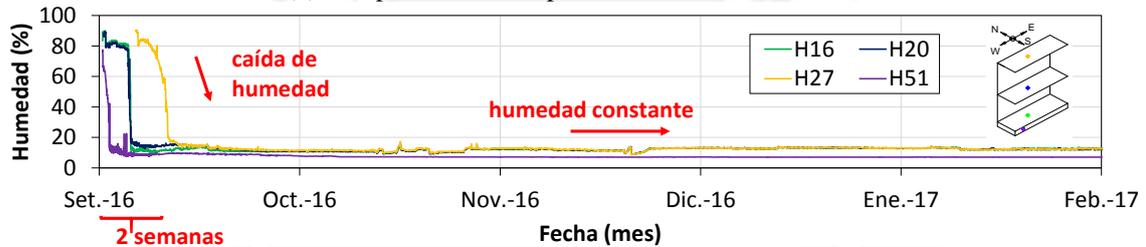
muro, esto demuestra que tampoco existe una influencia considerable de la humedad interna en esta zona.



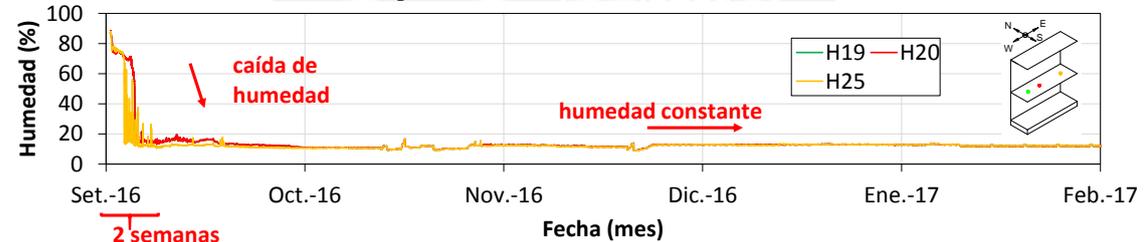
(a) Comparación de temperaturas internas en altura



(b) Comparación de temperaturas internas en la mitad



(c) Comparación de humedades internas en altura



(d) Comparación de humedades internas en la mitad

Figure 5.20 Variación de temperatura y humedad en diferentes secciones transversales para el muro tipo II.

La Figura 5.21 muestra la variación de temperatura y humedad para el muro tipo III. En la Figura 5.21a se muestra el registro completo de las temperaturas a lo alto del muro alcanzado una temperatura mínima y máxima de 18°C y 38°C respectivamente. En la Figura 5.21b se observa que las temperaturas internas a media altura muestran valores parecidos en magnitud y tendencia, sin embargo existe una ligera variación al centro ya que en varios puntos presenta valores más altos lo que hace suponer de la capacidad de almacenamiento de calor.

La Figura 5.21c muestra un comportamiento similar a los muros tipo I y II ya que la humedad es prácticamente constante en un valor promedio de 7.5% para el contacto con la cimentación y 11.5% para las demás secciones. Por último, en la Figura 5.21d los sensores de humedad registraron una humedad superior al 85% y luego de 2 semanas el valor disminuyó hasta 10% similar a los otros muros.

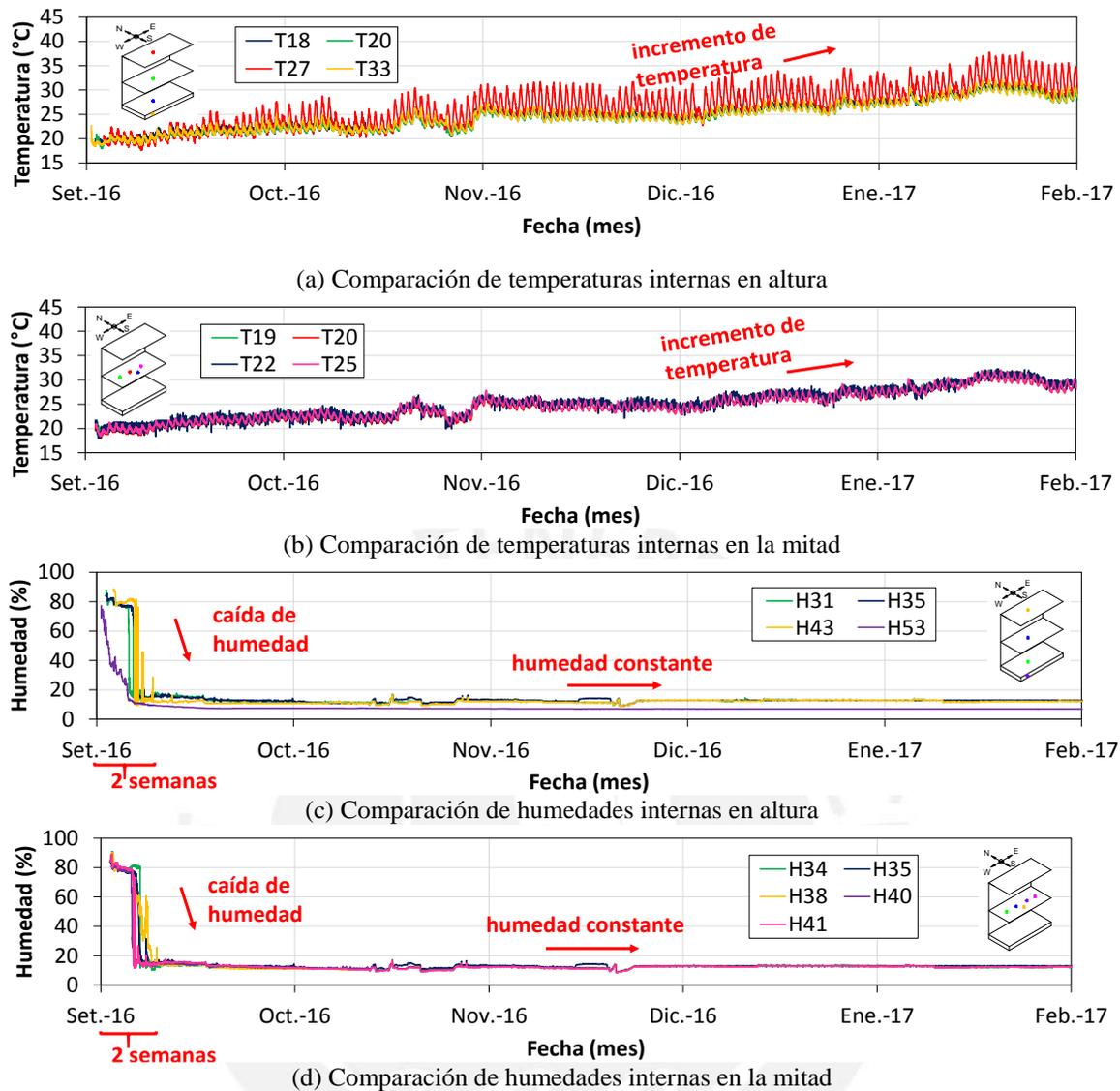


Figure 5.21 Variación de temperatura y humedad en diferentes secciones transversales para el muro tipo III.

Comparación de temperatura y humedad según el espesor del muro

Se realizó una comparación entre los factores ambientales externos y la temperatura y humedad interna para los tres muros de adobe ya que se encontraron algunas diferencias de acuerdo a cada espesor.

La Figura 5.22a muestra la variación de la temperatura interna obtenida de un sensor ubicado en la mitad de cada muro y se realiza una comparación con la temperatura ambiental. Se puede apreciar que la temperatura interna de los muros alcanza valores más altos y más prolongados que la temperatura ambiental, esto se puede entender ya que el adobe se calienta y es capaz de almacenar calor durante varias horas al día. La temperatura ambiental es la que sufre mayor variación durante el proceso de monitoreo obteniendo un valor mínimo de 16°C y un máximo de 34°C. Por otro lado se obtuvo un rango de temperatura ambiental promedio de 6.0°C durante todo el proceso de monitoreo. En el caso del muro tipo I las variaciones de temperatura son más grandes y más parecidas a los de la temperatura ambiental ya que estos

oscilan en un rango promedio de 3.5°C , esto se puede entender debido al poco espesor que posee el muro (22 cm). La temperatura interna del muro tipo I presenta un valor mínimo y máximo de 18.5°C y 34.0°C respectivamente durante los 5 meses que duró el monitoreo. Para el muro tipo II (espesor de 56cm) el comportamiento es diferente ya que se muestra que no existe mucha variación durante el día y que las temperaturas siempre están por encima de la ambiental con un rango promedio de 1.5°C . La temperatura interna del muro tipo II presenta un valor mínimo y máximo de 17.5°C y 31.0°C respectivamente durante todo el tiempo de monitoreo. En el caso del muro tipo III el cual tiene como mayor espesor de 80cm se muestra un comportamiento parecido al muro tipo II ya que el rango de variación de la temperatura es de 1.5°C . La temperatura interna del muro tipo III presenta un valor mínimo de 18.0°C y máximo de 32.0°C . En conclusión los dos muros de mayor espesor presentan una mayor capacidad de almacenamiento de calor ya que durante todo el tiempo de monitoreo se registraron valores altos de temperatura que no aumentaron el rango de 2°C .

Por otro lado los tres muros tienen un comportamiento particular ya que durante todo el tiempo de monitoreo nunca llegan a tener valores de temperatura interna por debajo de la ambiental y siempre están calientes a pesar que la temperatura ambiental disminuye. Con esto se demuestra la propiedad de los adobes para absorber la energía solar durante el día y para transferirlo como calor por la noche debido a que es un buen aislante térmico.

La Figura 5.22b muestra el análisis de la variación térmica durante un día en particular y nos permite identificar que existe un lapso de tiempo o retraso entre la temperatura ambiental y la temperatura interna para cada muro. Lo anterior se debe a que el espesor de los muros influye en las mediciones de temperatura de una manera considerable. En el caso del muro tipo I se obtuvo un lapso de tiempo de 4 horas entre la máxima temperatura ambiental y la interna, mientras que para los muros tipo II y III este tiempo es más prolongado teniendo valores de 5 y 6 horas respectivamente. Esto se puede entender de acuerdo al espesor variable de cada muro ya que es directamente proporcional al tiempo de retraso y tiene que ver con la capacidad de almacenamiento de calor y la propiedad de estos para absorber energía solar durante el día. Por ejemplo el muro tipo I por ser más delgado (espesor=22cm) no almacena tanto calor y el muro tipo II (espesor=56cm) al igual que el muro tipo III (espesor=80cm) presentan una mayor capacidad de almacenamiento de calor. En base a los resultados se demuestra como los muros de mayor espesor (tipo II y III) retienen más el calor durante un tiempo más prolongado ya que las temperaturas registradas en ningún momento son menores a la del muro tipo I.

La Figura 5.22c muestra la variación de la humedad interna obtenida del promedio de las tres zonas inferior, intermedia y superior para cada muro y se realiza una comparación con la humedad ambiental. La humedad ambiental dio como un valor máximo de 99% al finalizar el invierno en el mes de setiembre y un valor mínimo de 46% durante el verano en el mes de enero. En el caso de la humedad interna no existe gran diferencia si considerar el promedio o cualquiera de los registros ubicados en alguna sección en particular, ya que los resultados muestran datos prácticamente constantes de 12% para los tres muros. En este caso no se consideró el efecto de la cimentación ya que como se comprobó esta humedad siempre está por debajo de las otras tres y además porque en este análisis estamos estudiando el

comportamiento térmico del adobe y no del contacto entre el concreto y el adobe. El día de la construcción se obtuvo valores promedios de humedad interna de 80% para el muro tipo I, de 85% para el muro tipo II y de 90% para el muro tipo III y conforme fueron transcurriendo los días estos fueron disminuyendo a valores constantes. La humedad ambiental varía durante el día en función inversa a la temperatura ambiental y la humedad interna se encuentra prácticamente constante lo que garantiza que los muros estén secos debido a las altas temperaturas del verano. En conclusión no existe una relación directa entre la humedad interna y la humedad ambiental.

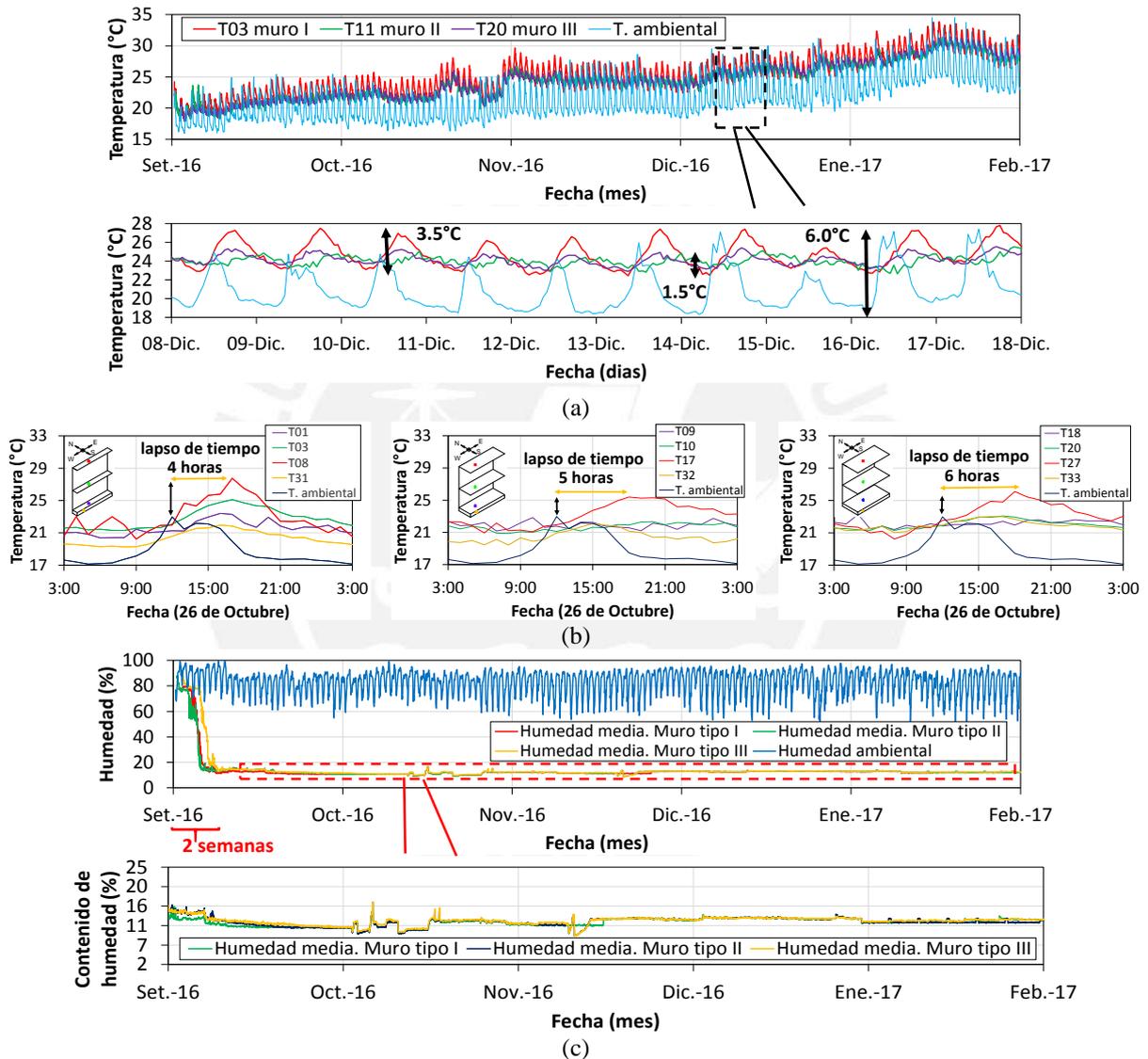


Figura 5.22 Comparación entre parámetros ambientales según el espesor de los muros (a) Temperatura (b) Lapso de tiempo en la temperatura (c) Humedad.

5.5 Correlación entre las frecuencias identificadas y los parámetros ambientales

Se estudian las correlaciones entre los factores ambientales y las frecuencias de vibración de los tres muros de adobe en donde se consideró aquellos que poseen una buena correlación. Para este análisis se realizaron todas las correlaciones disponibles entre las primeras cuatro

frecuencias y la temperatura y humedad tanto externa como interna obtenidas entre octubre del 2016 y febrero del 2017 para los tres muros. A partir del gran número de sensores internos instalados se realizó un estudio intenso de correlación para cada variable ambiental y de frecuencia.

En la Figura 5.23 y en el Anexo del Capítulo 5 se muestra la correlación entre las primeras cuatro frecuencias y los factores ambientales internos y externos para el muro tipo I. Se puede mostrar las correlaciones positivas entre las frecuencias de vibración y la temperatura externa e interna es decir la tendencia de los datos tiene una pendiente positiva. Para analizar cuantitativamente todas las correlaciones entre frecuencias y factores ambientales externos e internos se calcula el coeficiente de determinación (R^2) como el cuadrado del coeficiente de correlación. Se encuentra que el R^2 entre las frecuencias y la temperatura ambiental es parecido al obtenido con las temperaturas internas e inclusive que la temperatura media interna. El R^2 entre la frecuencia 1 y temperatura ambiental es de 0.25 similar a la obtenida con la temperatura media y de la misma manera se puede observar en la Figura 5.23 los valores de R^2 para las demás frecuencias. Por lo tanto, la relación entre frecuencias y temperatura no puede obtenerse suficientemente utilizando solo la temperatura interna o externa. En conclusión es mejor realizar un análisis de las correlaciones de temperatura tanto interna como externa ya que de esta manera podemos definir qué temperatura considerar y cuál es la más influyente.

De la gran cantidad de sensores internos de temperatura se obtuvo diferentes R^2 y teniendo en cuenta las consideraciones descritas en 5.4.3 ya que algunas zonas se calientan más que otras, se tomaron una temperatura interna promedio. Es por este motivo que se consideró las mediciones de temperatura como un promedio de la parte inferior, intermedia y superior del muro tipo I.

Las correlaciones entre las frecuencias de vibración y la humedad ambiental presentan una tendencia negativa con un R^2 muy bajo y para las frecuencias y la humedad interna se presenta una ligera correlación positiva ya que los valores son prácticamente constantes. Estos valores de R^2 se muestran en la Figura 5.23 y con más detalle en el Anexo del Capítulo 5. De acuerdo a los resultados la humedad interna en el muro tipo I es prácticamente constante para todos los sensores colocados, es por esta razón que se consideró las mediciones de humedad media en todas las secciones obteniéndose una correlación promedio. Sin embargo para un mayor detalle se muestran en el Anexo del Capítulo 5 las correlaciones entre las frecuencias y las humedades internas para todos los sensores. En conclusión las correlaciones obtenidas son demasiado débiles para concluir confiablemente acerca del comportamiento físico que rigen los efectos de la humedad en las frecuencias naturales.

En todas las gráficas de correlaciones se observa que existe una dependencia temporal en la variación de las frecuencias, debido a que la pendiente de las relaciones entre las frecuencias y los factores ambientales cambia a lo largo del tiempo con el cambio de las estaciones. Lo anterior se debe al efecto del cambio de la posición del sol a lo largo del año, calentando distintas zonas de los muros de adobe y sumado a esta la propiedad de actuar como un aislante térmico ya que retiene calor durante el día y libera durante la noche.

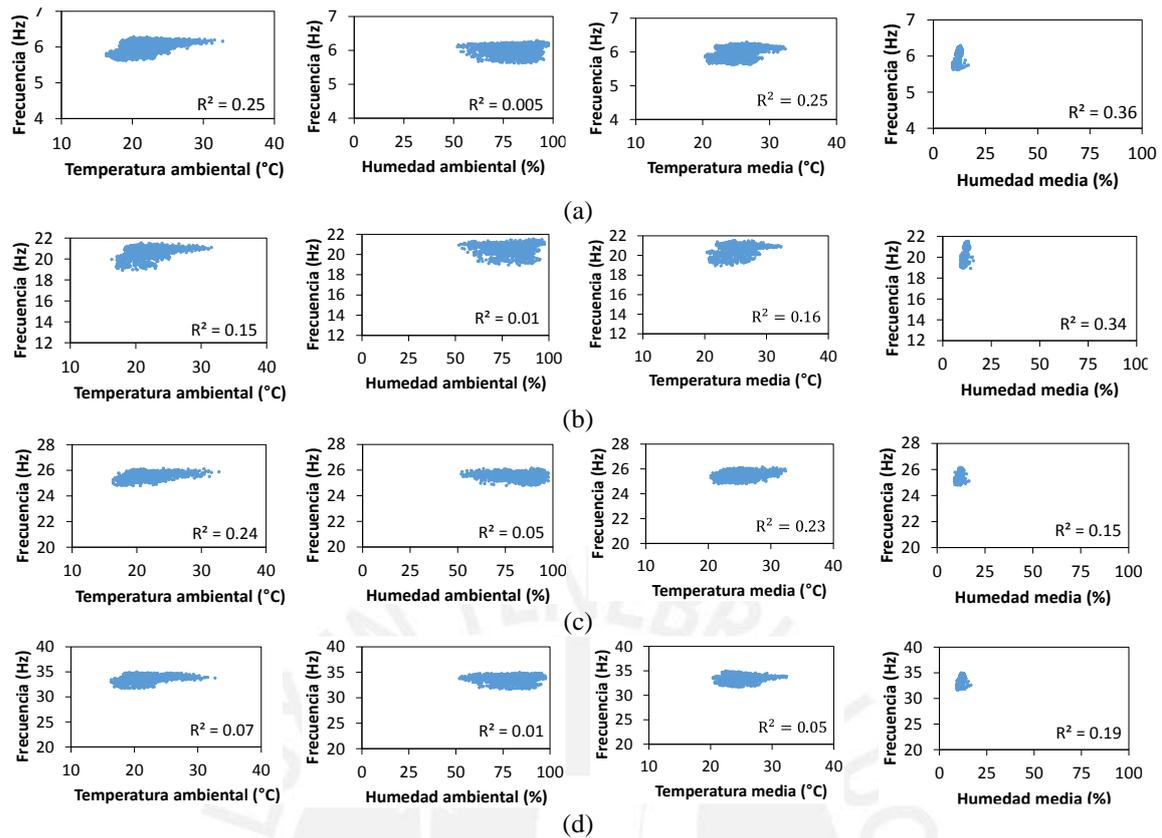


Figura 5.23 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo I (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.

Los resultados estadísticos de los parámetros ambientales y dinámicos para el muro tipo I se presentan en la Tabla 5.4. Los valores de temperatura y humedad ambiental promedio son de 21.1°C, 82.7%, respectivamente. La temperatura interna promedio es de 25.4°C y la humedad interna promedio es 12.2%. También se presenta la desviación estándar σ y el Coeficiente de Variación (CV), donde se hace hincapié en la poca variabilidad, especialmente para la humedad interna, ya que el valor de CV es de aproximadamente el 7.81%. Con respecto a los valores extremos, los valores mínimo y máximo son 16 y 32.7°C para la temperatura ambiental, 51.9 y 100% para la humedad relativa del aire, 20.4 y 32.3°C para la temperatura interna y 9.2 y 16.7% para la humedad interna. Los resultados estadísticos de los parámetros dinámicos estimados para el muro tipo I también se presentan en la Tabla 5.4. En este caso, el promedio de las cuatro frecuencias es de aproximadamente 6.0, 20.7, 25.6 y 33.8 Hz, con el orden de variabilidad parecido, y con valores de CV entre 0.9 y 3%. Con respecto a los valores extremos, los valores mínimos y máximos son 5.6 y 6.3 Hz para la primera frecuencia, 18.9 y 21.5 Hz para la segunda frecuencia, 24.8 y 26.2 Hz para la tercera frecuencia y 31.7 y 35.0 Hz para la cuarta frecuencia.

Tabla 5.4 Resultados estadísticos del muro tipo I.

	Parámetros ambientales				Parámetros dinámicos			
	Temperatura del aire (°C)	Humedad del aire (%)	Temperatura media (°C)	Humedad media (%)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Promedio	21.1	82.7	25.4	12.2	6.0	20.7	25.6	33.8
σ	2.804	9.179	2.302	0.952	0.151	0.515	0.249	0.606
CV (%)	13.30	11.10	9.06	7.81	2.51	2.49	0.98	1.79
Máximo	32.7	100	32.3	16.7	6.3	21.5	26.2	35.0
Mínimo	16.0	51.9	20.4	9.2	5.6	18.9	24.8	31.7

La Figura 5.24 y el Anexo del Capítulo 5 muestran la correlación entre los parámetros ambientales y las frecuencias del muro tipo II así como el valor de R^2 . En este caso se obtuvo que las correlaciones entre frecuencias y temperatura ambiental, temperatura interna y humedad interna presentan una tendencia positiva, sin embargo la humedad ambiental presenta una correlación negativa. Por otro lado el valor de R^2 entre las frecuencias y la temperatura interna es mayor que para la temperatura ambiental, es decir mientras más espesor tenga el muro la temperatura interna será la más influyente. Como se puede apreciar para la frecuencia 1 y la temperatura media el $R^2 = 0.45$ el cual es superior al calculado para la temperatura ambiental ($R^2 = 0.40$) y de la misma manera se puede comprobar para las demás frecuencias. En el caso de la correlación entre frecuencias y humedad ambiental las correlaciones dieron valores muy bajos de R^2 y por otro lado como la humedad interna es constante no se puede obtener claramente la influencia de la humedad en las frecuencias.

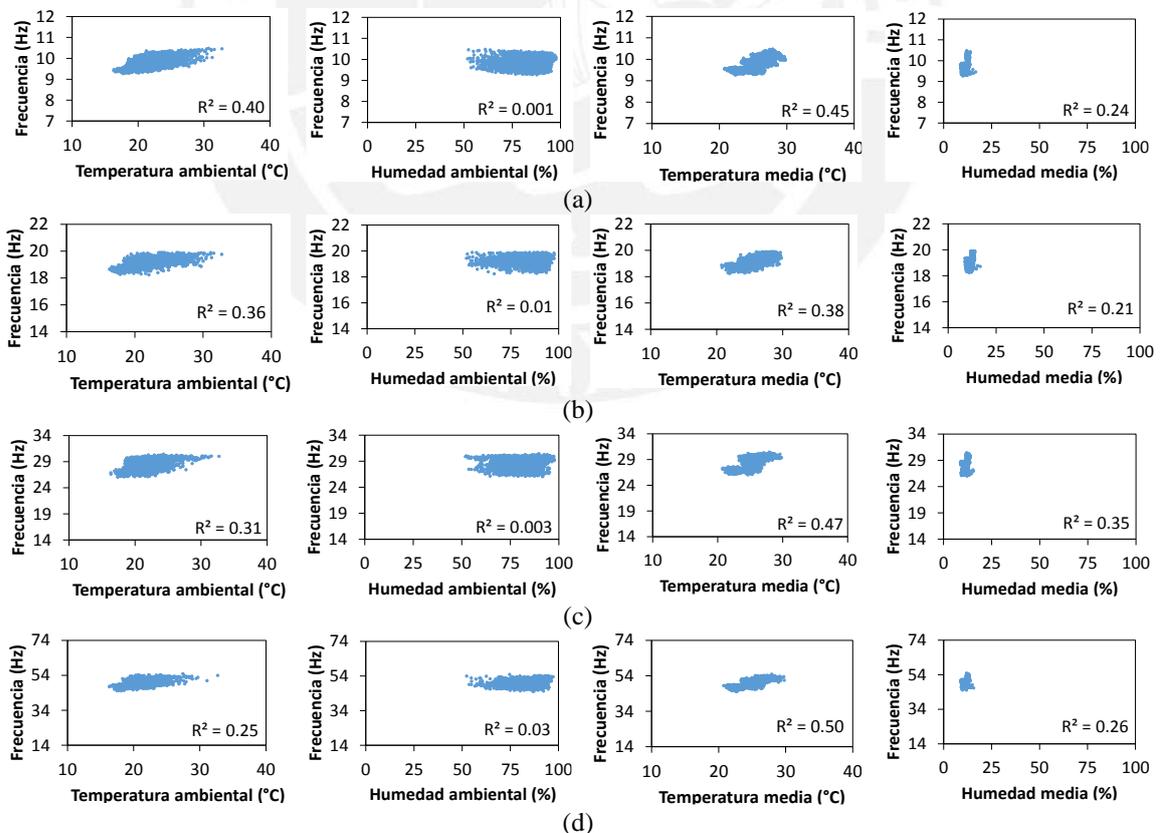


Figura 5.24 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo II (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.

En la Tabla 5.5 se muestran los resultados estadísticos de los parámetros ambientales y frecuencias para el muro tipo II. El promedio de temperatura ambiental, humedad ambiental, temperatura y humedad interna es de 21.1°C, 82.7%, 25.5°C y 12.2% respectivamente. Para el caso de la temperatura interna el valor del CV es de 6.85%. Los valores mínimo y máximo son 16 y 32.7°C para la temperatura ambiental, 51.9 y 100% para la humedad relativa del aire, 20.8 y 29.8°C para la temperatura interna, 8.8 y 16.7% para la humedad interna. El promedio de las cuatro frecuencias es de aproximadamente 9.8, 19.1, 28.5 y 49.8 Hz los cuales presentan parecida variabilidad con valores de CV entre 1 y 4.5%. Con respecto a los valores extremos, los valores mínimos y máximos son 9.3 y 10.5 Hz para la primera frecuencia, 18.2 y 19.9 Hz para la segunda frecuencia, 26.0 y 30.5 Hz para la tercera frecuencia, y 45.2 y 55.0 Hz para la cuarta frecuencia.

Tabla 5.5 Resultados estadísticos del muro tipo II.

	Parámetros ambientales				Parámetros dinámicos			
	Temperatura del aire (°C)	Humedad del aire (%)	Temperatura media (°C)	Humedad media (%)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Promedio	21.1	82.7	25.5	12.2	9.8	19.1	28.5	49.8
σ	2.804	9.179	1.741	1.021	0.272	0.330	1.122	2.039
CV (%)	13.30	11.10	6.85	8.38	2.78	1.73	3.94	4.10
Máximo	32.7	100	29.8	16.7	10.5	19.9	30.5	55.0
Mínimo	16.0	51.9	20.8	8.8	9.3	18.2	26.0	45.2

La Figura 5.25 muestra la correlación entre la temperatura y humedad externa e interna con las frecuencias del muro tipo III y de la misma manera se calcula los valores de R^2 . Se obtuvo que las correlaciones entre frecuencias y temperatura ambiental, temperatura interna y humedad interna presentan una tendencia positiva, sin embargo la humedad ambiental presenta una correlación negativa. Por otro lado al igual que el muro tipo II el R^2 es mucho mayor para la correlación entre las frecuencias y la temperatura interna lo que quiere decir que para el muro con mayor espesor la temperatura interna influye más. Por ejemplo para la frecuencia 1 y la temperatura media el $R^2 = 0.57$ el cual es mayor que el calculado para la temperatura ambiental ($R^2 = 0.39$) y así se puede comprobar para las demás frecuencias.

En la correlación entre las frecuencias y la humedad ambiental se obtuvieron valores muy bajos y de acuerdo a los resultados la temperatura interna es considerada prácticamente constante de donde no se tiene certeza de los efectos de la humedad en las frecuencias. Adicionalmente se podría entender que no existe una influencia de la humedad interna ya que la mayor parte del tiempo de monitoreo los muros se encontraron en la estación de verano donde se dieron las máximas temperaturas y por consiguiente los muros estuvieron secos.

Para más detalle de las correlaciones entre las frecuencias y cada uno de los sensores de temperatura y humedad se puede observar los resultados en el Anexo del Capítulo 5.

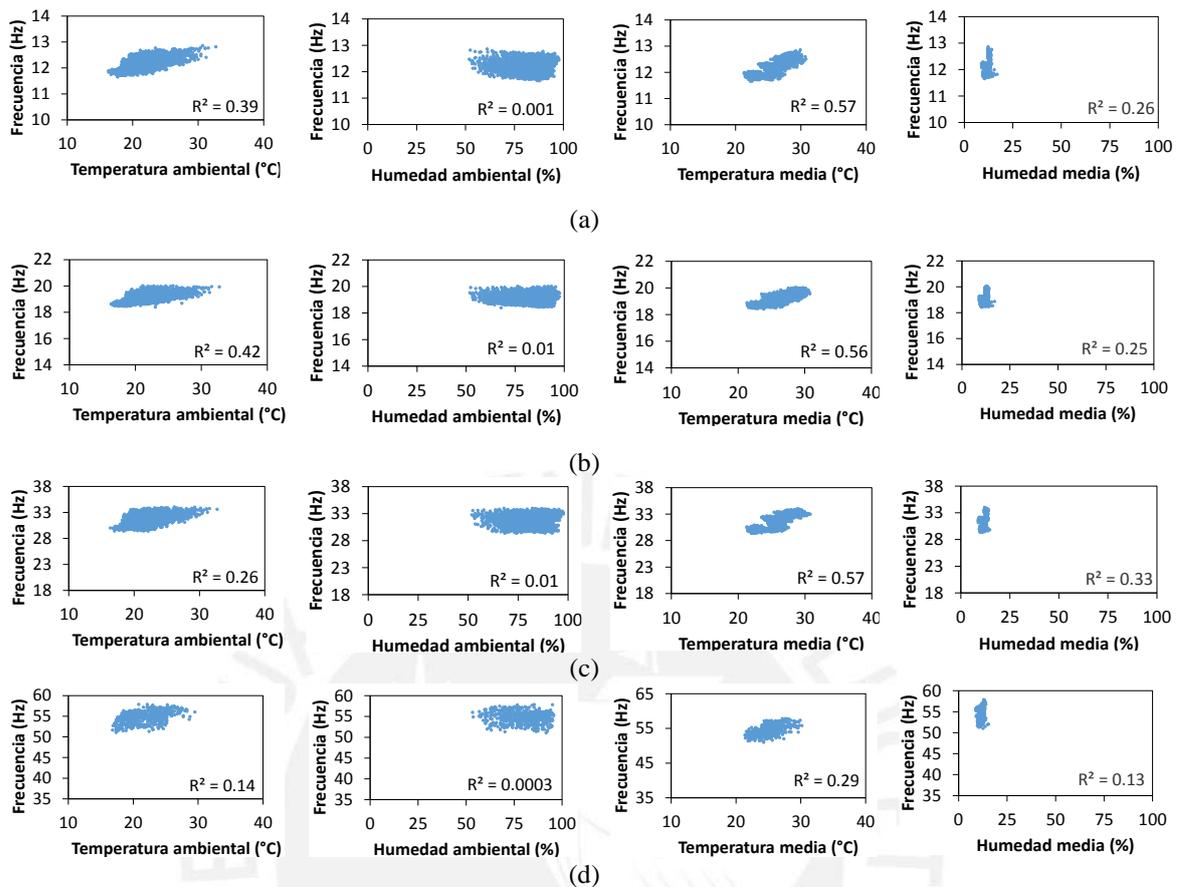


Figura 5.25 Relación entre frecuencias y factores ambientales para el muro tipo III (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.

Para el muro tipo III se muestra en la Tabla 5.6 un análisis estadístico detallado. El promedio de temperatura y humedad ambiental es de 21.1°C y 82.7%, respectivamente. Los valores medios de temperatura y humedad interna son de 26.0°C y 12.4%, respectivamente. Para la humedad interna el valor del CV es de 7.38%. Los valores mínimo y máximo son 16 y 32.7°C para la temperatura ambiental, 51.9 y 100% para la humedad ambiental, 21.3 y 30.8°C para la temperatura interna, 8.9 y 16.9% para la humedad interna. El promedio de las cuatro frecuencias es de 12.2, 19.1, 31.9 y 54.9 Hz y presentan valores de CV entre 1 y 3.5%. Finalmente los valores mínimos y máximos son de 11.7 y 12.9 Hz para la primera frecuencia, 18.4 y 20.0 Hz para la segunda, 29.4 y 34.0 Hz para la tercera y 51.1 y 57.9 Hz para la cuarta.

Tabla 5.6 Resultados estadísticos del muro tipo III.

	Parámetros ambientales				Parámetros dinámicos			
	Temperatura del aire (°C)	Humedad del aire (%)	Temperatura media (°C)	Humedad media (%)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Promedio	21.1	82.7	26.0	12.4	12.2	19.1	31.9	54.9
σ	2.804	9.179	1.919	0.987	0.245	0.344	1.114	1.316
CV (%)	13.30	11.10	7.38	7.97	2.00	1.80	3.49	2.40
Máximo	32.7	100	30.8	16.9	12.9	20.0	34.0	57.9
Mínimo	16.0	51.9	21.3	8.9	11.7	18.4	29.4	51.1

Variación diaria de frecuencias debido a los factores ambientales

La Figura 5.26 muestra los registros de las cuatro frecuencias en conjunto con los parámetros ambientales internos y externos para el muro tipo I y se muestra a detalle como varían a diario. Estos resultados muestran que las frecuencias disminuyen con el incremento de la temperatura tanto ambiental como interna y lo contrario ocurre con la humedad ambiental. Por otro lado la humedad interna es prácticamente constante por lo que las correlaciones obtenidas no tienen mucha influencia en las frecuencias.

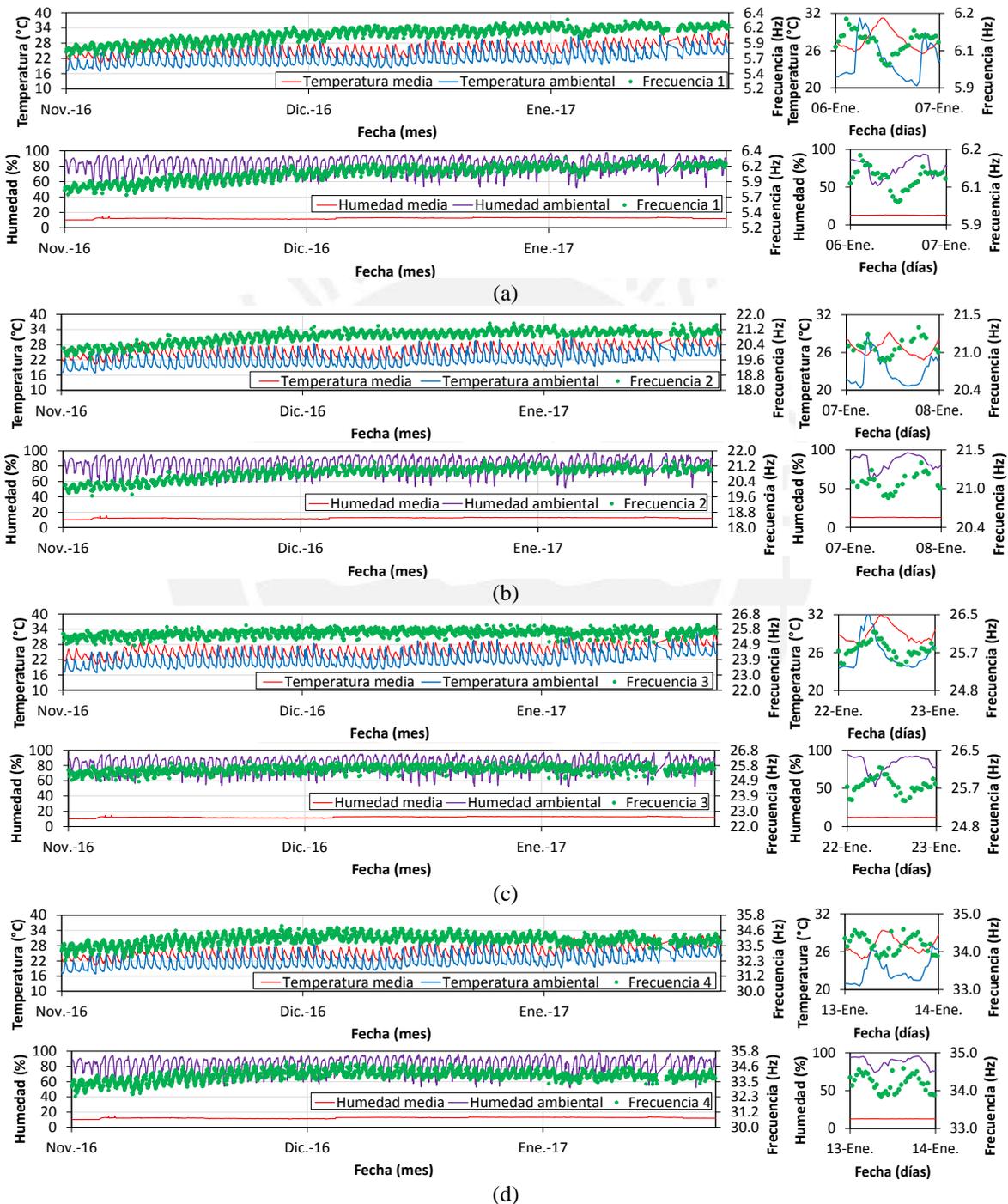


Figura 5.26 Registros de frecuencias y parámetros ambientales para el muro tipo I (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.

En la Figura 5.27 se muestra los registros de las frecuencias comparando con la temperatura y humedad ambiental e interna para el muro tipo II. Así mismo se muestra la variación a detalle para unos días en particular. Se ve que a medida que la temperatura ambiental incrementa las frecuencias y la humedad ambiental disminuyen. Por otro lado la humedad interna es prácticamente constante durante todo el tiempo del monitoreo por lo que las correlaciones obtenidas son demasiado débiles para concluir de manera fiable que existe un efecto significativo sobre las frecuencias modales.

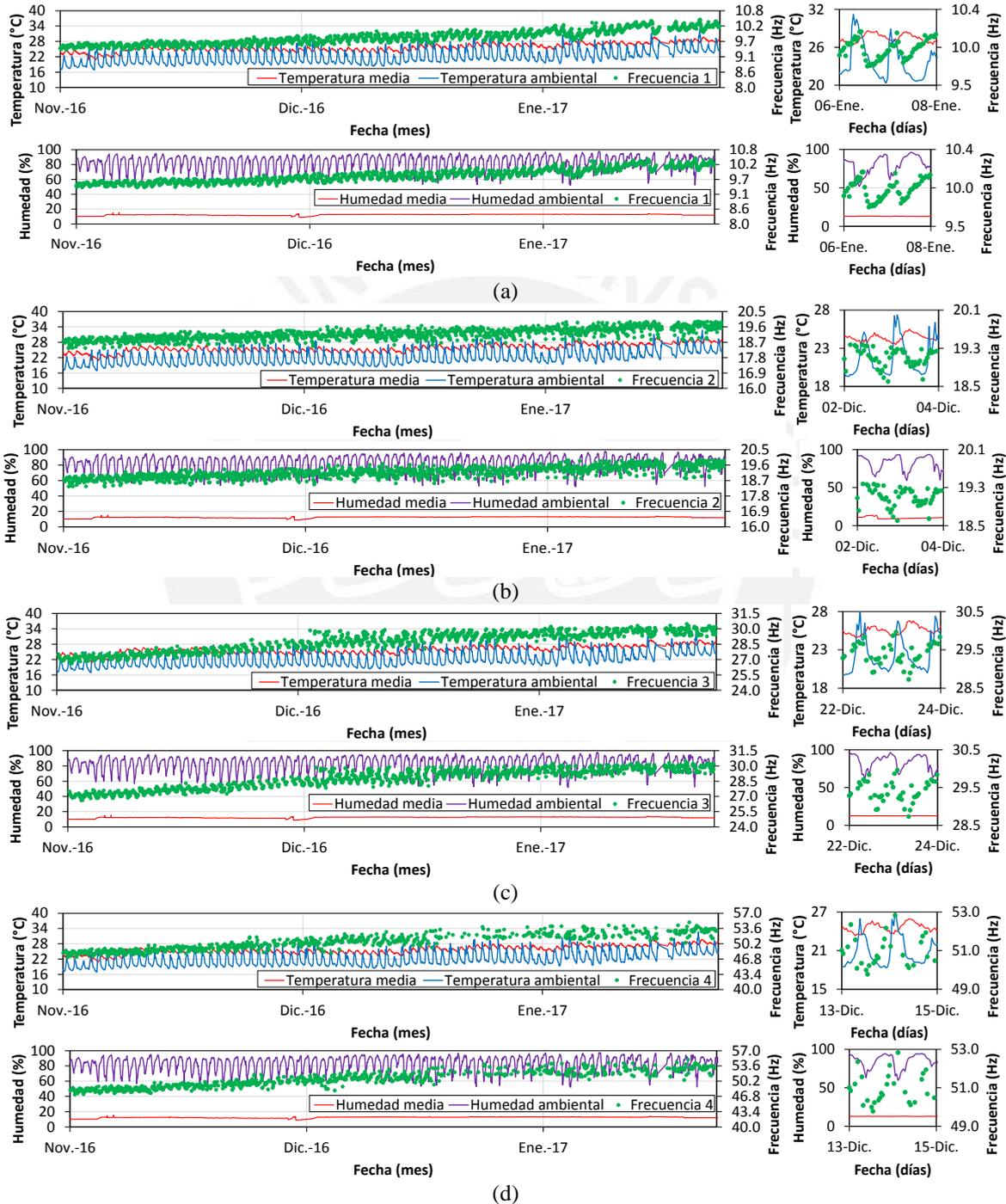


Figura 5.27 Registros de frecuencias y parámetros ambientales para el muro tipo II (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.

La Figura 5.28 muestra la variación diaria y por meses de las frecuencias y los parámetros ambientales para el muro tipo III. Se puede observar la influencia de la temperatura ambiental ya que mientras la temperatura se incrementa las frecuencias y la humedad ambiental disminuyen. De acuerdo a los resultados obtenidos en 5.4.3 la humedad interna permanece constante durante todo el tiempo lo que implica que no presenta gran influencia en la disminución o aumento de las frecuencias. Por último la frecuencia 4 no presenta una tendencia de la subida y la bajada producto del incremento de temperatura.

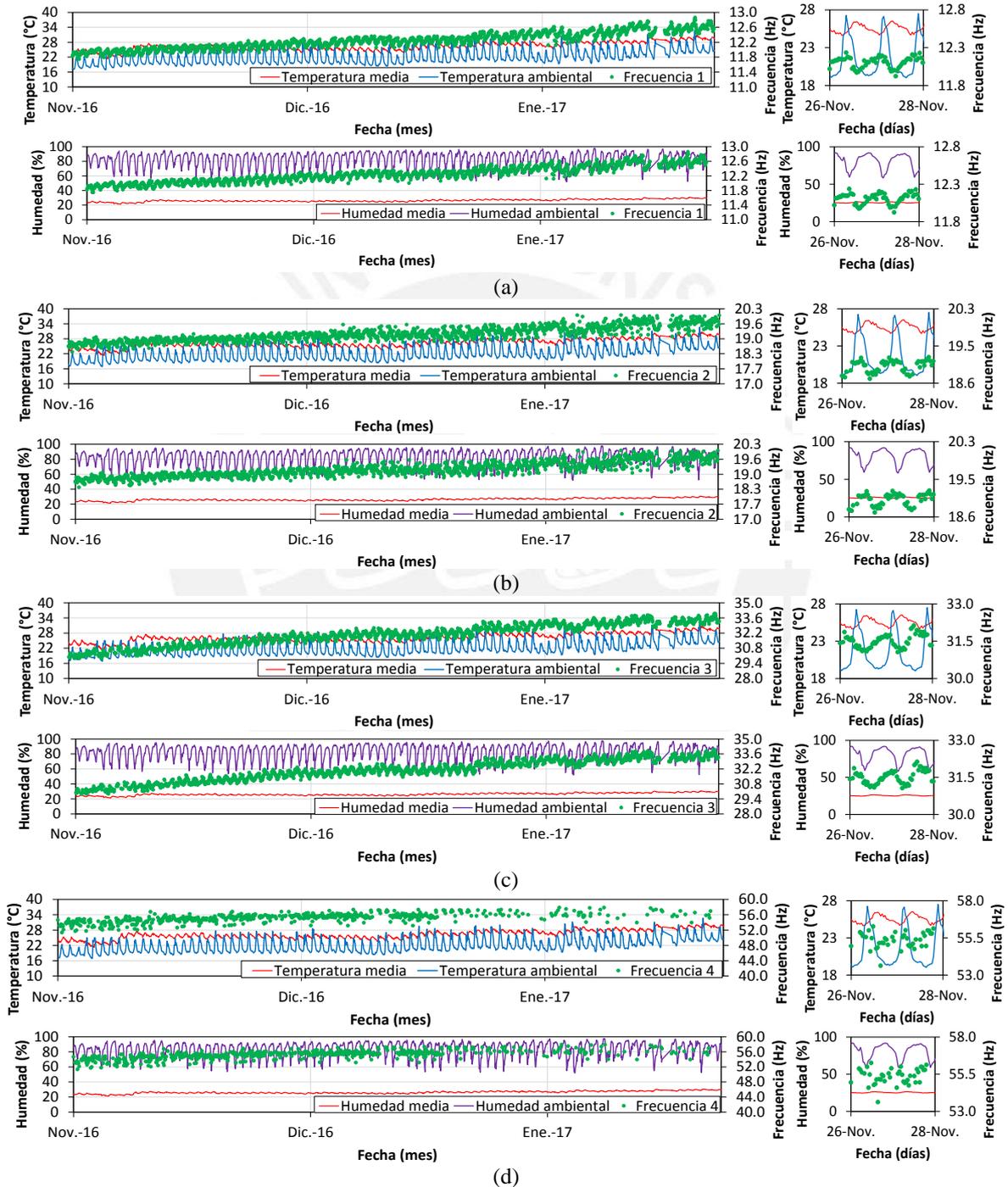


Figura 5.28 Registros de frecuencias y parámetros ambientales para el muro tipo III (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.

Comparación de frecuencias y parámetros ambientales según el espesor del muro

Las frecuencias modales cambian significativamente con la variación de la temperatura interna y cada frecuencia disminuye con el aumento de la temperatura. Por lo tanto, esto demuestra que la relación entre las frecuencias modales y la temperatura no pueden ser analizadas solo utilizando la temperatura ambiental.

La Figura 5.29 muestra la relación a detalle que existe entre las frecuencias y la temperatura ambiental e interna obteniendo el tiempo de desfase promedio para cada muro de adobe. Como se vio en el análisis del factor de determinación los mejores valores del R^2 se dan entre las frecuencias y la temperatura interna ya que poseen una correlación casi perfecta y es por este motivo que entre estos parámetros no existe un desfase de tiempo considerable. Por otro lado si existe un desfase de tiempo entre las frecuencias y la temperatura ambiental que está muy relacionado con el espesor del muro. A continuación se hará un análisis detallado para cada muro de adobe.

En la Figura 5.29a se grafica la relación entre las cuatro frecuencias y la temperatura ambiental e interna para el muro tipo I observándose una clara relación que existe entre estas variables. Existe un desfase promedio de 6 h entre la frecuencia 1 y la temperatura ambiental lo cual tiene relación con el efecto retardado que tiene la temperatura sobre el muro. De la misma manera para la frecuencia 3 que es un modo traslacional existe un desfase promedio de 5 h. Por otra parte se observa que las frecuencias 2 (modo torsional) y 4 (modo flexural) tienen una correlación con un desfase mucho menor de 4 h y 3 h respectivamente, teniendo el mismo comportamiento para la frecuencia 1 y 3 en relación a la temperatura ambiental.

La Figura 5.29b muestra la relación entre las frecuencias y las temperaturas para el muro tipo II observándose un tiempo de desfase particular entre la temperatura ambiental y las frecuencias. Para la frecuencia 1 y la temperatura ambiental se muestra un desfase promedio de 7 h mayor al muro tipo I. La frecuencia 2 que es un modo traslacional tiene un desfase promedio de 6 h. Así mismo se observa que la frecuencia 3 (modo torsional) presenta un desfase promedio menor de 5 h con la temperatura ambiental y la frecuencia 4 de 4 h. Es de gran importancia mencionar que los primeros modos presentan una mejor tendencia de la subida y bajada de las frecuencias producto del incremento diario de la temperatura ambiental.

En la Figura 5.29c se grafica la variación entre la temperatura interna y ambiental y las frecuencias obtenidas del muro tipo III. Para la frecuencia 1 existe un tiempo de desfase promedio de 8 h entre la frecuencia y la temperatura ambiental, el cual a diferencia de los otros muros tiene un tiempo más prolongado ya que es el muro de mayor espesor. De la misma manera para las frecuencias 2 (modo traslacional) y frecuencia 3 (modo torsional) existe un desfase promedio mucho mayor que el de los otros muros de 7 h y 6 h respectivamente. Por otro lado se observa que en los resultados de la frecuencia 4 para el muro tipo III no existe una tendencia marcada de las subidas y bajadas producto del incremento de la temperatura por lo que no se considera un lapso de tiempo promedio.

En conclusión mientras más grande sea el espesor del muro más será el tiempo de retraso que existe entre las frecuencias y la temperatura ambiental ya que los muros de mayor espesor tienden a retener más calor producto de las altas temperaturas del día anterior.

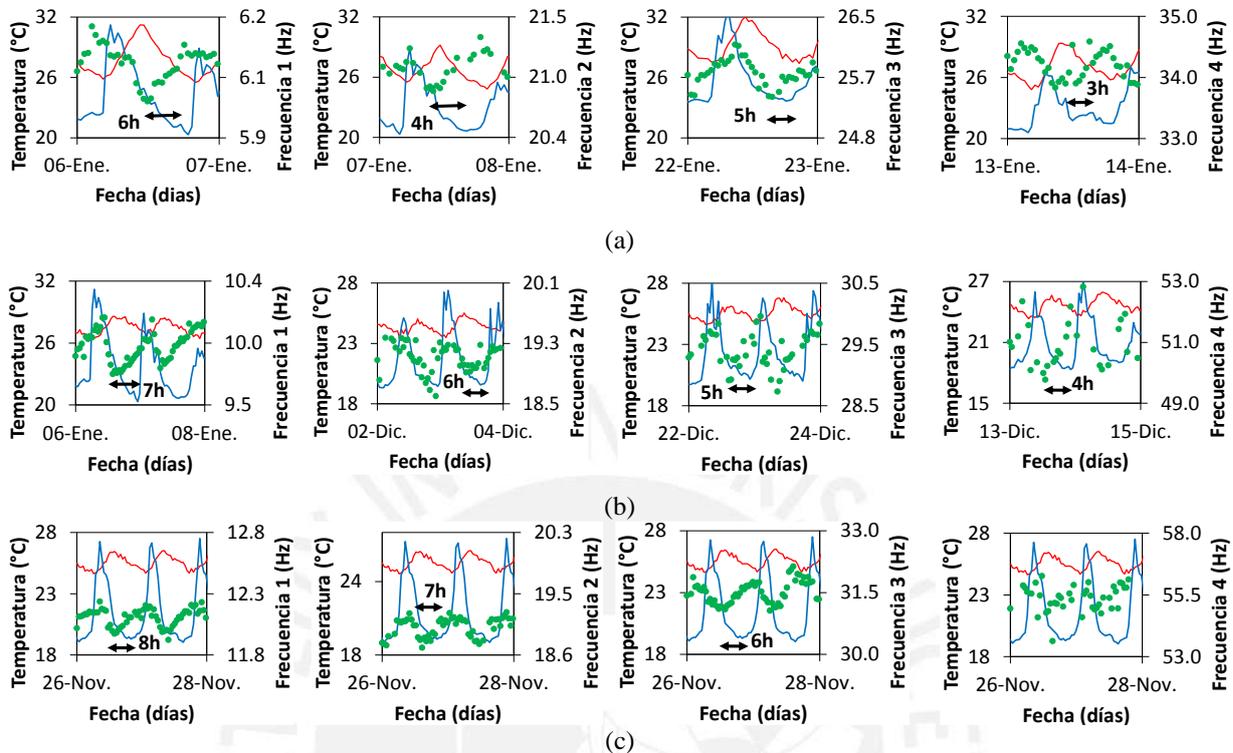


Figura 5.29 Desfase entre frecuencias y temperatura ambiental (a) Muro tipo I (b) Muro tipo II (c) Muro tipo III.

La Figura 5.30 muestra la variación detallada que existe entre las frecuencias y la humedad ambiental e interna obteniendo el tiempo de desfase promedio para cada muro de adobe. La Figura 5.30a muestra el desfase de tiempo promedio que existe entre las frecuencias y la humedad ambiental para el muro tipo I. En este caso los gráficos de la humedad ambiental son consecuentes con el resultado obtenido para la temperatura ya que la humedad relativa es dependiente de la temperatura. De esta manera se observa que para la frecuencia 1, 2, 3 y 4 los desfases de la humedad ambiental son del mismo valor que el de las frecuencias con la temperatura ambiental (6 h, 4 h, 5 h y 3 h respectivamente).

De la misma manera en la Figura 5.30b y 5.30c se muestra el lapso de tiempo promedio entre la humedad ambiental y las frecuencias para los muros II y III respectivamente. Se observa que para el muro tipo II las frecuencias 1, 2, 3 y 4 presenta desfases promedios de 7 h, 6 h, 5 h y 4 h respectivamente. Para el muro tipo III los desfases promedios para las frecuencias 1, 2 y 3 son de 8 h, 7 h y 6 h respectivamente. Por otro lado se observa que en los resultados de la frecuencia 4 para el muro tipo III no existe una tendencia marcada por lo que al igual que la temperatura ambiental no se considera un lapso de tiempo para la humedad ambiental. Finalmente la humedad interna no presenta gran influencia en las frecuencias ya que permanece prácticamente constante durante el tiempo de monitoreo.

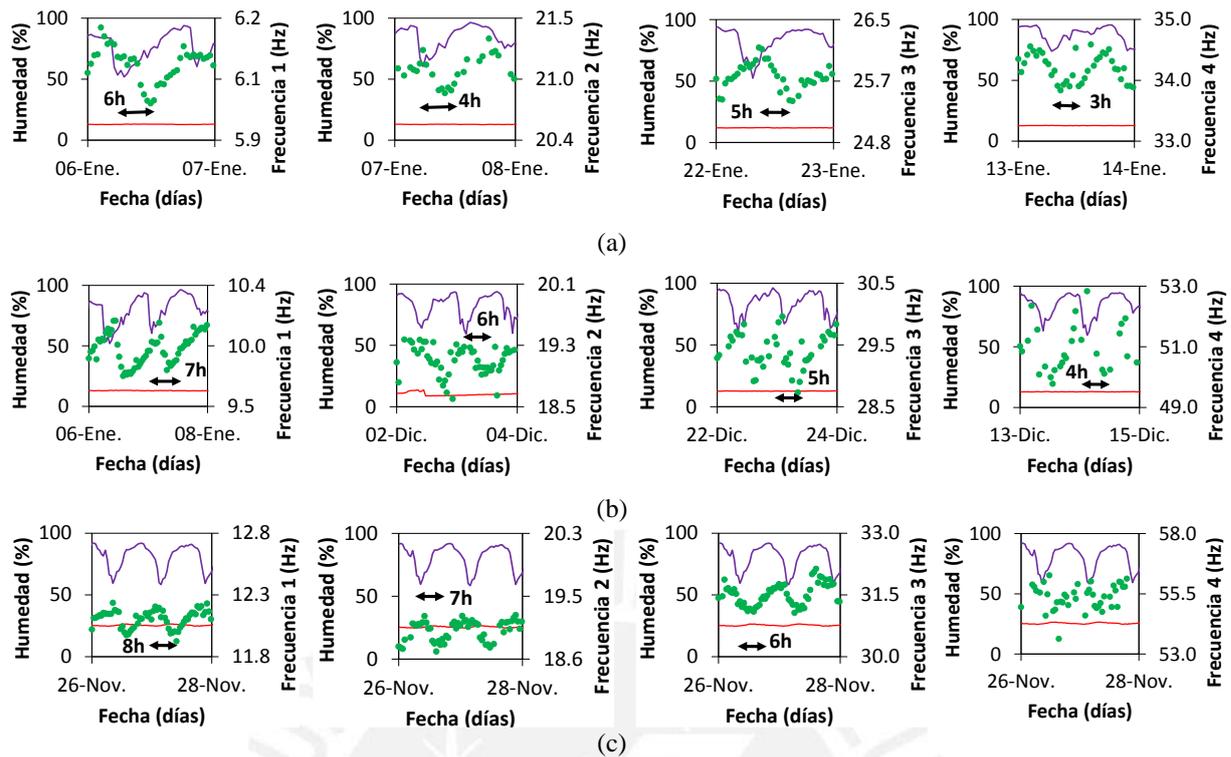


Figura 5.30 Desfase entre frecuencias y humedad ambiental (a) Muro tipo I (b) Muro tipo II (c) Muro tipo III.

5.6 Regresión multiparamétrica lineal (MLRM)

Es importante que se tenga en cuenta la distribución no uniforme de la temperatura interna en los muros de adobe para cuantificar con exactitud el efecto de la temperatura en las frecuencias naturales. Se opta por graficar el modelo MLRM con las temperaturas internas como predictores dado que la temperatura es el predictor ideal considerando que las variaciones de las frecuencias de los muros son producto de este efecto. Para este propósito se analiza la naturaleza de los datos ya que en los primeros meses tienden a subir debido al proceso de secado y en los meses posteriores se estabilizan. Se evaluó el subgrupo de datos del 50%:50% para estimar y validar los modelos de las cuatro frecuencias para los tres muros de adobe. Se consideraron los datos del mes de octubre y mitad del mes de noviembre del 2016 para construir las muestras de entrenamiento para los modelos cuantitativos y para verificar el performance de la predicción en el caso del proceso de secado. De la misma manera se utilizó la otra mitad para la estimación y validación de las frecuencias cuando ya se estabilizaron. Se consideraron los datos de temperatura media obtenidos de las tres secciones transversales de cada muro sin considerar el contacto con la cimentación por ser de concreto. Para lo cual se creó una rutina en MATLAB y se utilizó la función de ajuste multiparamétrico *robustfit*, el cual permite que las temperaturas funcionen como predictores para las regresiones.

En la Figura 5.31 se muestra las cuatro frecuencias modales identificadas y las predictivas para el muro de adobe tipo I. El modelo multiparamétrico de regresión lineal es desarrollado considerando la distribución no uniforme de la temperatura y expresado en la ecuación 2.1. Donde f_m es la frecuencia modal predicha por el modelo MLRM, $\beta_1 - \beta_8$ son los

coeficientes de la regresión y $T_1 - T_8$ son las variables predictoras. Para el caso del muro tipo I se consideró 8 temperaturas internas ($T_{01}, T_{02}, T_{03}, T_{04}, T_{05}, T_{06}, T_{07}, T_{08}$) para realizar las predicciones debido a que dieron buenos resultados durante todo el tiempo de monitoreo y presentan una buena correlación. En la Figura 5.31 se puede ver que las frecuencias 1, 2 y 4 reproducidas por el modelo MLRM coinciden en tendencia y magnitud con las frecuencias modales identificadas sin embargo la frecuencia 3 no coincide en magnitud pero si en tendencia. Los modelos MLRM entre las frecuencias y las temperaturas internas construidas para las muestras de entrenamiento se muestran a continuación:

$$f_1 = 5.58 + 0.08T_{01} + 0.05T_{02} - 0.07T_{03} + 0.04T_{04} + 0.004T_{05} - 0.05T_{06} - 0.04T_{07} - 0.009T_{08}$$

$$f_2 = 18.63 + 0.45T_{01} + 0.28T_{02} - 0.47T_{03} + 0.01T_{04} - 0.10T_{05} - 0.07T_{06} + 0.02T_{07} - 0.04T_{08}$$

$$f_3 = 24.89 + 0.10T_{01} + 0.11T_{02} - 0.17T_{03} + 0.17T_{04} - 0.02T_{05} + 0.07T_{06} + 0.05T_{07} - 0.04T_{08}$$

$$f_4 = 32.03 + 0.62T_{01} + 0.35T_{02} - 0.45T_{03} + 0.24T_{04} - 0.19T_{05} - 0.26T_{06} - 0.18T_{07} - 0.05T_{08}$$

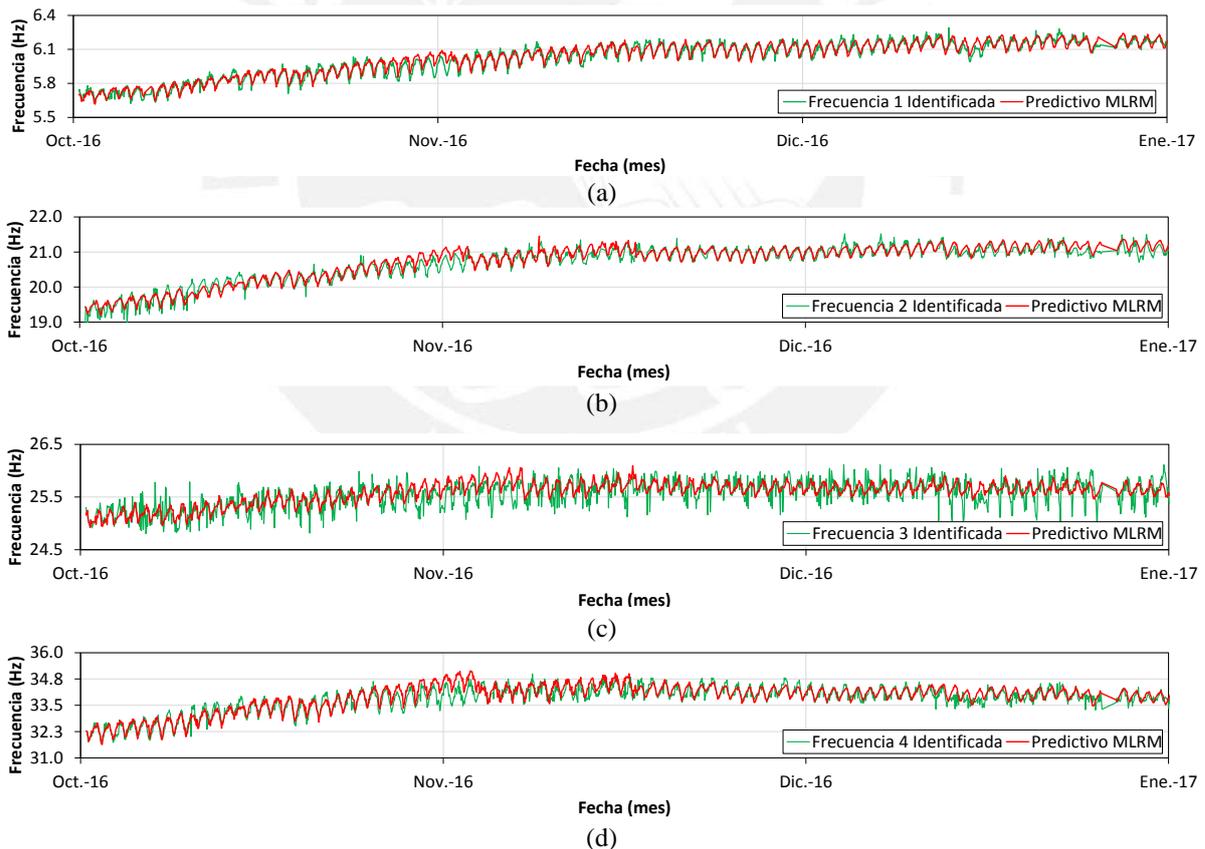


Figura 5.31 Modelos de regresión multiparamétrica (Temperatura interna) para el muro tipo I (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.

Los coeficientes de determinación (R^2) para las muestras de entrenamiento y para la validación fueron calculados y se muestran en la Tabla 5.7 para las primeras cuatro

frecuencias del muro tipo I. Para las frecuencias 1, 2 y 4 el valor de R^2 es alto el cual nos indica que existe una buena aproximación tanto para la etapa de secado como para cuando las frecuencias se estabilizan. De la misma manera las gráficas nos muestran que existe una buena estimación tanto en tendencia como en magnitud. Sin embargo, para la frecuencia 3 se obtuvo un R^2 bajo esto debido a la naturaleza de los datos ya que no se puede diferenciar de manera clara las subidas y bajadas de las frecuencias producto de la temperatura. En conclusión el modelo MLRM puede lograr una cuantificación favorable para la influencia de la temperatura interna en las frecuencias naturales siempre y cuando se obtenga una buena tendencia de los datos.

Tabla 5.7 R^2 de los modelos MLRM para la estimación y validación del muro tipo I.

Frecuencias	Primera parte		Segunda parte	
	Modelo (50%)	Predicción (50%)	Modelo (50%)	Predicción (50%)
Frecuencia 1	0.89	0.80	0.82	0.79
Frecuencia 2	0.88	0.74	0.81	0.77
Frecuencia 3	0.49	0.45	0.47	0.44
Frecuencia 4	0.87	0.77	0.78	0.75

La Figura 5.32 muestra las cuatro frecuencias modales identificadas y las predictivas para el muro de adobe tipo II. Para el caso del muro tipo II se consideró 6 temperaturas internas ($T_{09}, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{15}, T_{17}$) para realizar las predicciones y estimaciones debido a los resultados obtenidos en las correlaciones del acápite 5.5. Se puede observar que las frecuencias reproducidas 1 y 3 coinciden en magnitud y tendencia con las frecuencias identificadas, sin embargo la frecuencia 2 no coincide en magnitud pero sí en tendencia. Por último debido a la gran variabilidad de los datos obtenidos para la frecuencia 4 no se logró buena aproximación tanto en tendencia como en magnitud.

Los modelos MLRM entre las frecuencias y las temperaturas internas construidas para las muestras de entrenamiento se muestran a continuación:

$$f_1 = 10.15 + 0.02T_{09} - 0.09T_{10} + 0.08T_{11} + 0.07T_{12} - 0.07T_{15} - 0.02T_{17}$$

$$f_2 = 19.35 + 0.09T_{09} - 0.24T_{10} + 0.01T_{11} + 0.23T_{12} - 0.10T_{15} - 0.01T_{17}$$

$$f_3 = 30.09 + 0.14T_{09} - 0.24T_{10} + 0.39T_{11} + 0.17T_{12} - 0.48T_{15} - 0.07T_{17}$$

$$f_4 = 52.37 + 0.38T_{09} - 0.74T_{10} + 0.92T_{11} + 0.67T_{12} - 1.07T_{15} - 0.26T_{17}$$

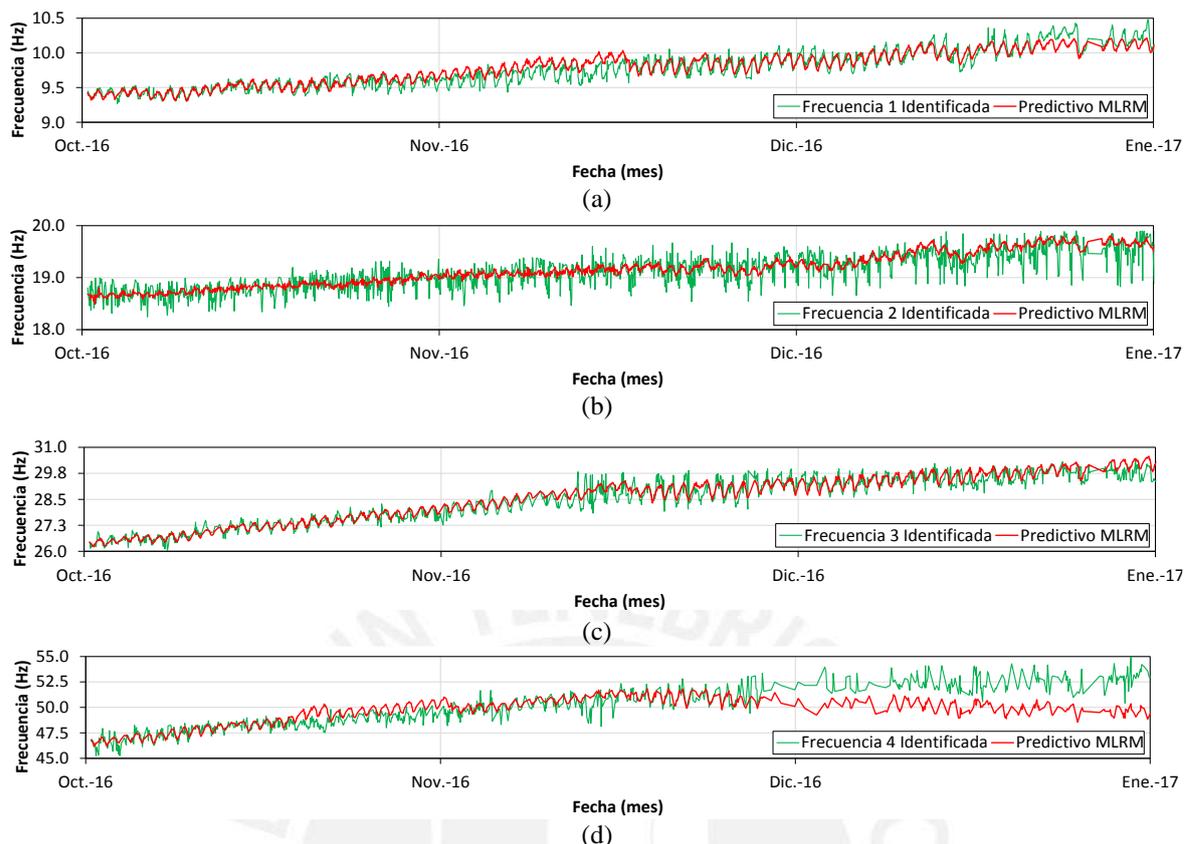


Figura 5.32 Modelos de regresión multiparamétrica (Temperatura interna) para el muro tipo II (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.

Se calculó el R^2 para las muestras de entrenamiento y para la validación de los modelos predictivos de las cuatro frecuencias del muro tipo II los cuales se resumen en la Tabla 5.8. Para la frecuencia 1 y 2 se obtuvieron buenos modelos tanto para la primera como para la segunda parte (periodo de secado y estabilización) esto se corrobora con el alto valor del R^2 . Sin embargo los modelos obtenidos para la frecuencia 2 no nos permitieron obtener buenos resultados ya que los valores de R^2 son bajos. En el caso de la frecuencia 4 ocurrió algo particular ya que para la etapa de secado se obtuvieron valores altos de R^2 y para cuando las frecuencias se estabilizaron el R^2 fue muy bajo esto debido a la naturaleza de los datos ya que las frecuencias no fueron identificadas claramente.

Tabla 5.8 R^2 de los modelos MLRM para la estimación y validación del muro tipo II.

Frecuencias	Primera parte		Segunda parte	
	Modelo (50%)	Predicción (50%)	Modelo (50%)	Predicción (50%)
Frecuencia 1	0.74	0.70	0.70	0.68
Frecuencia 2	0.28	0.25	0.26	0.22
Frecuencia 3	0.87	0.75	0.69	0.64
Frecuencia 4	0.72	0.37	0.28	0.20

En la Figura 5.33 se muestra las cuatro frecuencias modales identificadas y las predictivas para el muro de adobe tipo III. En el caso del muro tipo III se consideró 7 temperaturas internas ($T_{18}, T_{19}, T_{20}, T_{22}, T_{25}, T_{26}, T_{27}$) para realizar la estimación y predicción. Se puede ver que las frecuencias reproducidas 1 y 3 coinciden en magnitud y tendencia con las

frecuencias modales identificadas, sin embargo las frecuencias 2 y 4 no coinciden en magnitud debido a la naturaleza de los datos. Los modelos MLRM entre las frecuencias y las temperaturas internas construidas para las muestras de entrenamiento se muestran a continuación:

$$f_1 = 10.99 - 0.06T_{18} - 0.02T_{19} - 0.11T_{20} - 0.03T_{22} + 0.16T_{25} + 0.13T_{26} - 0.04T_{27}$$

$$f_2 = 17.57 - 0.05T_{18} - 0.08T_{19} - 0.11T_{20} - 0.03T_{22} + 0.23T_{25} + 0.13T_{26} - 0.04T_{27}$$

$$f_3 = 25.09 - 0.17T_{18} - 0.004T_{19} - 0.46T_{20} - 0.09T_{22} + 0.38T_{25} + 0.59T_{26} - 0.06T_{27}$$

$$f_4 = 44.73 + 0.06T_{18} + 0.11T_{19} - 0.30T_{20} + 0.04T_{22} - 0.10T_{25} + 0.55T_{26} + 0.01T_{27}$$

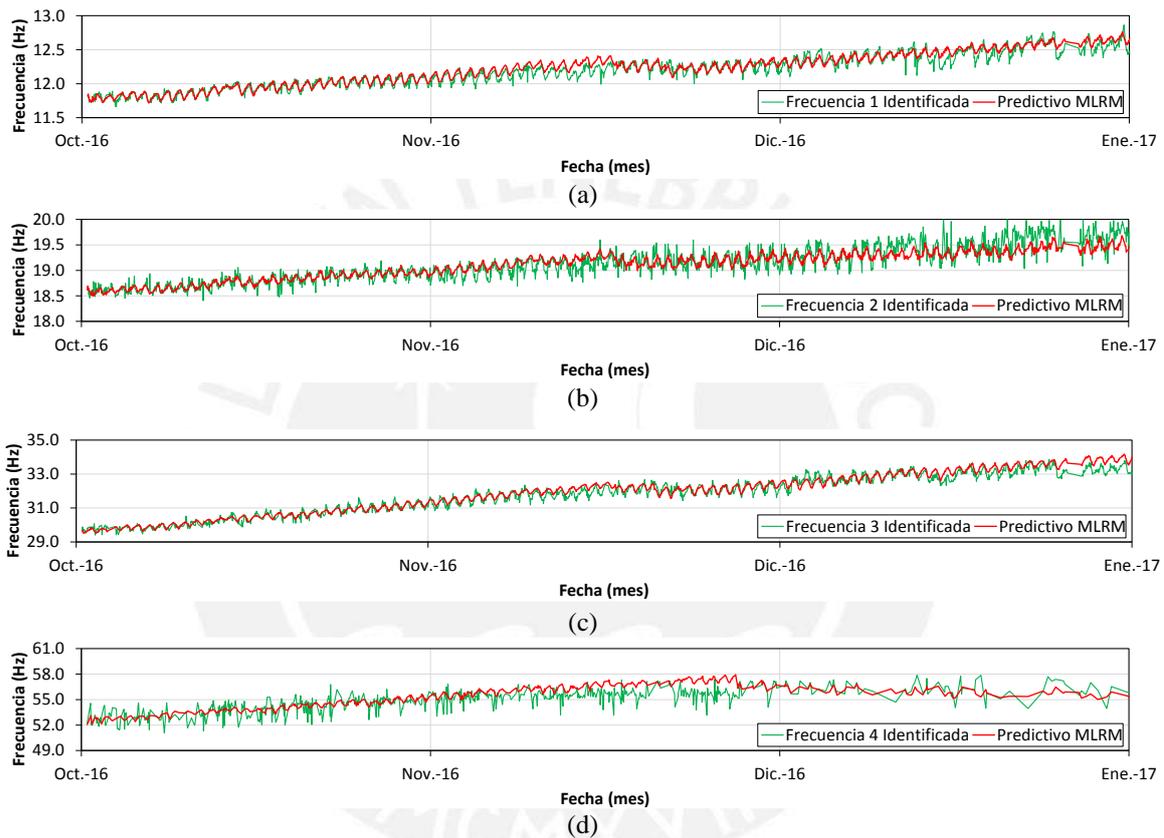


Figura 5.33 Modelos de regresión multiparamétrica (Temperatura interna) para el muro tipo III (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.

Se calcularon los coeficientes de determinación R^2 para las muestras de entrenamiento y validación del muro tipo III los cuales se resumen en la Tabla 5.9. En el caso de la frecuencia 1 y 3 se muestran valores altos de R^2 lo que significa que los modelos reproducen de una manera adecuada las frecuencias predictivas. Para la frecuencia 2 se obtuvieron valores de R^2 maso menos altos en la primera etapa sin embargo para la segunda etapa los valores son bajos. Finalmente para la frecuencia 4 los valores de R^2 son bajos lo que implica que los datos no son cíclicos como los otros casos, es decir no se aprecia de una forma clara la subida y bajada producto de la influencia de la temperatura. En conclusión el modelo MLRM puede lograr una cuantificación favorable para la influencia de la temperatura interna en las frecuencias naturales solo si los datos obtenidos siguen una tendencia clara.

Tabla 5.9 R² de los modelos MLRM para la estimación y validación del muro tipo III.

Frecuencias	Primera parte		Segunda parte	
	Modelo (50%)	Predicción (50%)	Modelo (50%)	Predicción (50%)
Frecuencia 1	0.87	0.75	0.65	0.63
Frecuencia 2	0.65	0.60	0.30	0.31
Frecuencia 3	0.89	0.80	0.74	0.70
Frecuencia 4	0.47	0.38	0.27	0.15

5.7 Modelo Auto-Regresivo con variable Exógena (ARX)

Debido a que las variables ambientales están cambiando las frecuencias de vibración de los tres muros de adobe, se realizó diversos modelos para estimar la respuesta dinámica según la temperatura media. Es por este motivo que en la presente investigación se evaluó la metodología para generar modelos autoregresivos con variable exógena (ARX), el cual fue explicado a detalle en el Capítulo 2. Un modelo ARX está definido por diversos coeficientes que pueden tomar muchos valores distintos, es decir existe una gran cantidad de modelos de polinomios en función de la cantidad de predictores y de las características de los datos. La idea principal es evaluar diversos modelos para escoger aquel que permita predecir de manera consistente las frecuencias de vibración. El modelo ARX tiene la ventaja de ser generado rápidamente ya que se obtienen al establecer la relación entrada-salida de un sistema mediante técnicas de identificación de sistemas.

5.7.1 Elección de modelos

Para generar los modelos ARX primero se tiene que elegir los coeficientes que definen a dicho modelo (n_a , n_b y n_k) los cuales se explicaron a detalle en el Capítulo 2. Para este propósito se utiliza el *System Identification Toolbox* de MATLAB para identificar los modelos que presentan los mejores ajustes. En todos los casos se utiliza como predictor la temperatura media y se analizan todas las combinaciones de coeficientes entre 1 y 10 para decidir qué modelos son los más adecuados.

Se establece el modelo ARX entre la frecuencia modal y la temperatura interna para cada muro de adobe debido a que existe una mayor correlación entre estas variables (ver sección 5.5) y se demuestra que los modelos ARX poseen un buen ajuste favorable. Se consideraron las variables de entrada (temperatura) y salida (frecuencia) obtenidas a través del sistema de monitoreo automático a partir de octubre del 2016 a enero del 2017. Se seleccionó un subgrupo de datos de 50%:50% para estimar y validar respectivamente los modelos ARX de las frecuencias de los tres muros de adobe.

5.7.2 Modelos con mejor ajuste

De la Figura 5.34 a la Figura 5.36 se grafican las simulaciones generadas por los mejores modelos ARX para predecir el comportamiento de las cuatro primeras frecuencias de vibración de los muros de adobe. En la Figura 5.34 se muestran los modelos predictivos ARX para el muro tipo I. Se observa que tanto para la frecuencia 1 y 3 es posible establecer modelos que permitan recrear la variación diaria y estacional de las frecuencias con relativo éxito, mientras que los modelos generados para la frecuencia 2 y 4 permiten una menor

estimación en la tendencia. Esto se puede entender debido a la naturaleza de los datos, ya que en los modos superiores 2 y 4 se puede apreciar una tendencia de subida más prolongada, mientras que las frecuencias 1 y 3 se estabilizan mucho más antes.

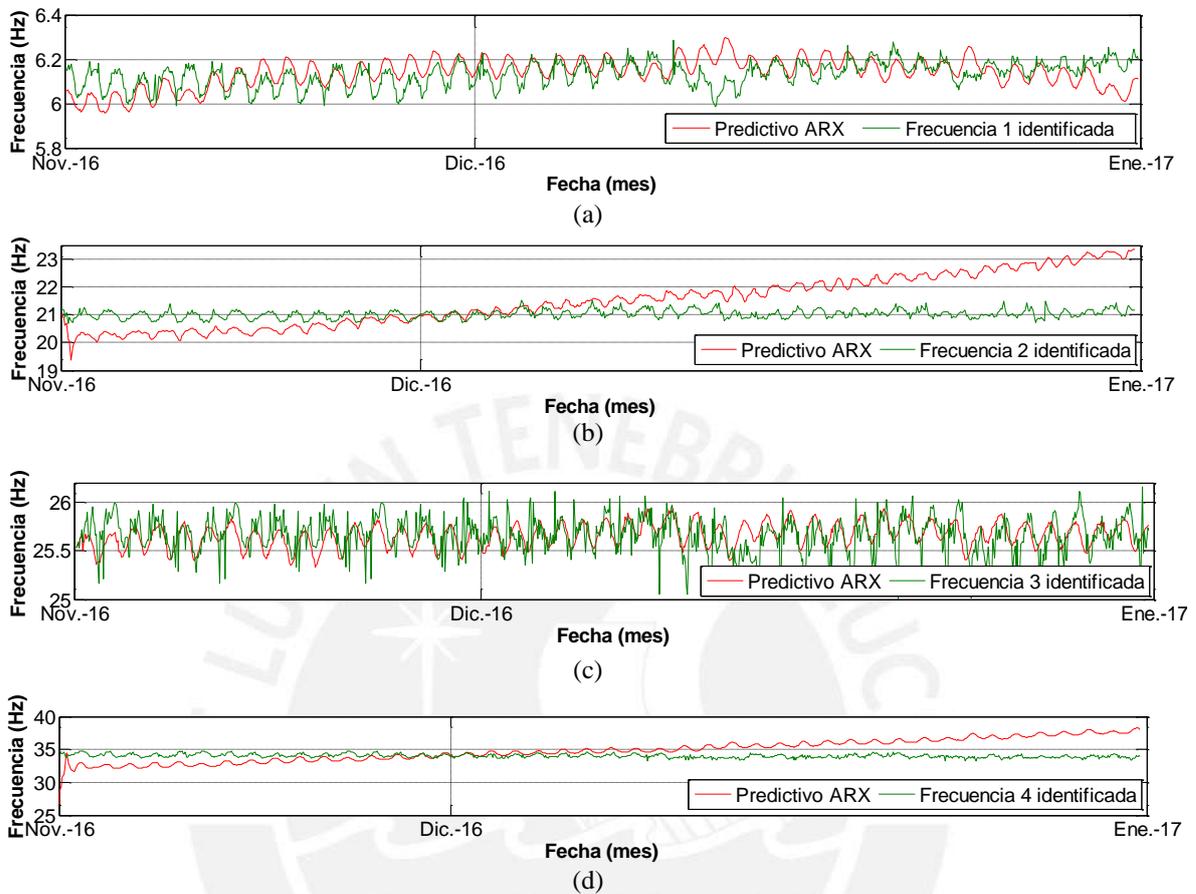


Figura 5.34 Modelos ARX (Temperatura interna) para el muro tipo I (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.

Los coeficientes R^2 para la estimación y validación de las primeras cuatro frecuencias del muro tipo I se muestran en la Tabla 5.10. Para la frecuencia 1 el valor de R^2 es alto el cual nos indica que existe una buena aproximación tanto para el modelo como para la predicción. Para la frecuencia 2 y 4 se obtuvo un R^2 relativamente bajo esto debido a que el modelo está influenciado por el proceso de secado lo cual hace que las frecuencias incrementen. En la frecuencia 3 se obtuvo un R^2 bajo debido a que existe mucha variabilidad en los datos. En conclusión el modelo ARX puede lograr una cuantificación favorable tanto en tendencia como en magnitud siempre y cuando se obtenga datos de frecuencias claras.

Tabla 5.10 Coeficientes de ajuste y R^2 de los modelos ARX del muro tipo I.

Frecuencias	Modelo (R^2)	Predicción (R^2)	Coefficientes [n_a, n_b, n_k]
Frecuencia 1	0.81	0.80	[3,10,10]
Frecuencia 2	0.50	0.48	[10,3,1]
Frecuencia 3	0.39	0.41	[6,10,2]
Frecuencia 4	0.60	0.57	[10,9,10]

La Figura 5.35 muestra los modelos ARX obtenidos para las cuatro frecuencias del muro tipo II. En la etapa de estimación las cuatro frecuencias tienen una tendencia a incrementar su valor y esto hace que en la validación se mantenga esta tendencia. En general para predecir el comportamiento de las cuatro primeras frecuencias de vibración se obtuvo una buena aproximación tanto en magnitud como en tendencia.

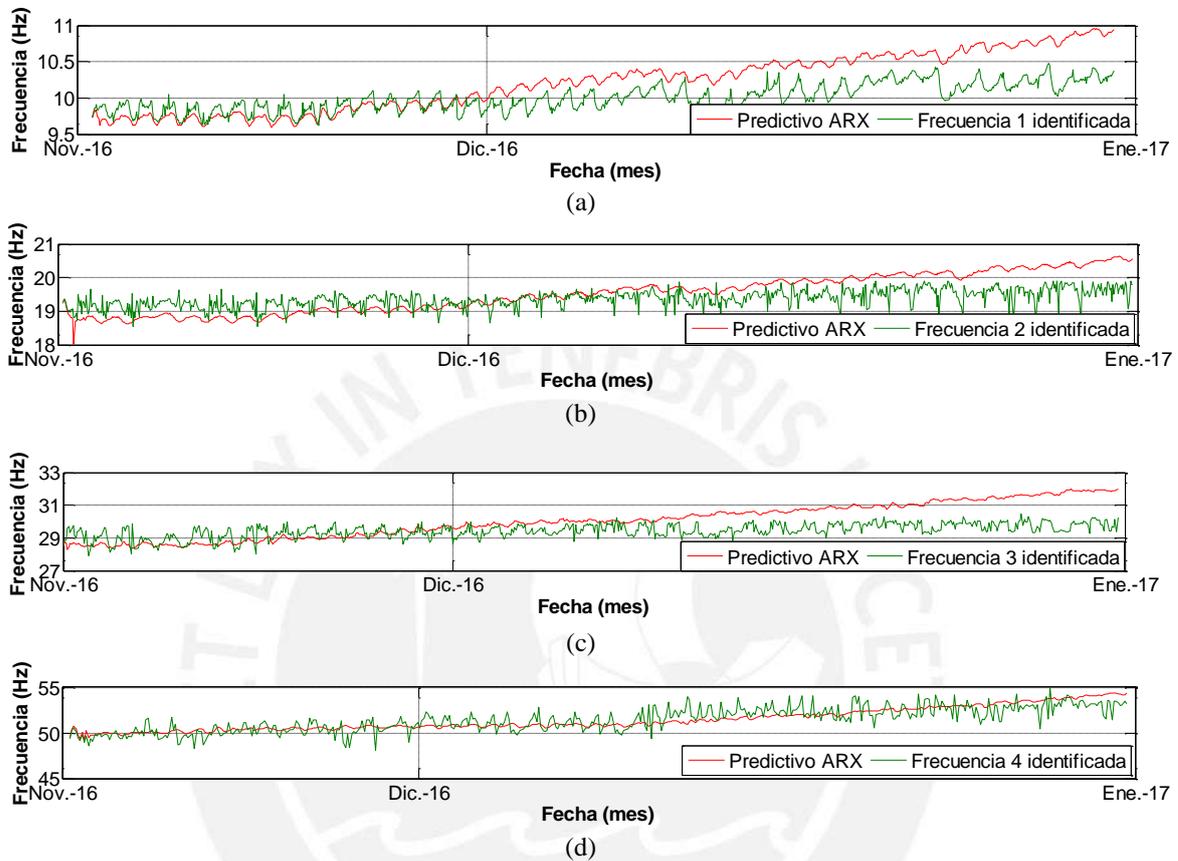


Figura 5.35 Modelos ARX (Temperatura interna) para el muro tipo II (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.

Se calculó el R^2 y los coeficientes de ajuste para las muestras de entrenamiento y para la validación de los modelos predictivos del muro tipo II los cuales se resumen en la Tabla 5.11. Para la frecuencia 1 y 3 se obtuvieron valores relativamente altos de R^2 lo que nos indica que son modelos aceptables para reproducir las frecuencias. Sin embargo los modelos obtenidos para la frecuencia 2 y 4 no nos permitieron obtener buenos resultados ya que los valores de R^2 son bajos.

Tabla 5.11 Coeficientes de ajuste y R^2 de los modelos ARX del muro tipo II.

Frecuencias	Modelo (R^2)	Predicción (R^2)	Coefficientes [n_a, n_b, n_k]
Frecuencia 1	0.63	0.60	[10,7,1]
Frecuencia 2	0.38	0.37	[10,10,2]
Frecuencia 3	0.52	0.51	[10,3,9]
Frecuencia 4	0.34	0.30	[10,3,1]

En la Figura 5.36 se observa que tanto para la frecuencia 2 como para la frecuencia 4 es posible establecer modelos con un buen ajuste tanto en tendencia como en magnitud, mientras que los modelos generados para la frecuencia 1 y 3 permiten reproducir con una menor estimación en la tendencia. Esto se puede entender debido a la naturaleza de los datos ya que al inicio existe un aumento en las frecuencias producto del periodo de secado y posteriormente se estabilizan.

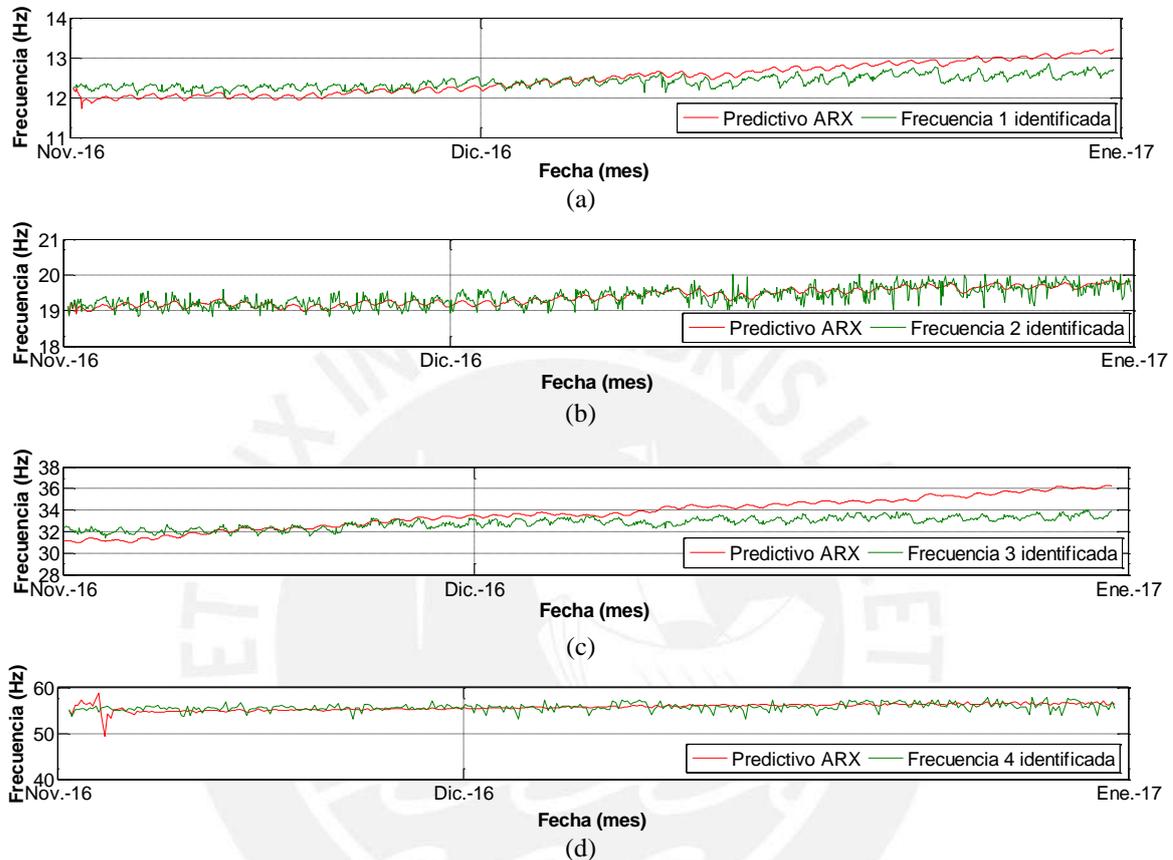


Figura 5.36 Modelos ARX (Temperatura interna) para el muro tipo III (a) Frecuencia 1 (b) Frecuencia 2 (c) Frecuencia 3 (d) Frecuencia 4.

Se calcularon los coeficientes de ajuste y de determinación R^2 para las muestras de entrenamiento y validación del muro tipo III los cuales se resumen en la Tabla 5.12. En el caso de la frecuencia 1 y 3 se muestran valores relativamente altos de R^2 lo que significa que los modelos pueden reproducir en cierta medida las frecuencias predictivas. Para la frecuencia 2 y 4 se obtuvieron valores de R^2 bajos lo que implica que los modelos no pueden reproducir claramente las frecuencias.

Tabla 5.12 Coeficientes de ajuste y R^2 de los modelos ARX del muro tipo III.

Frecuencias	Modelo (R^2)	Predicción (R^2)	Coefficientes [n_a, n_b, n_k]
Frecuencia 1	0.62	0.60	[10,8,1]
Frecuencia 2	0.53	0.50	[10,10,1]
Frecuencia 3	0.61	0.62	[3,10,7]
Frecuencia 4	0.34	0.30	[10,6,10]

Comparación del performance de los modelos MLRM y ARX para la predicción de frecuencias

La capacidad de reproducción de los modelos cuantitativos MLRM y autoregresivos ARX se examina utilizando las muestras de entrenamiento y validación comparando con los datos de frecuencias obtenidas. Para obtener las frecuencias simuladas se incorporó las variables de temperatura interna en las muestras de entrenamiento de ambos modelos. En general los resultados verifican una buena capacidad de reproducción del modelo MLRM y ARX para las frecuencias de vibración de los muros de adobe. Con el fin de cuantificar y clasificar la capacidad de reproducción de ambos modelos se obtiene la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) el cual se expresa de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \hat{f}_i)^2}{n}} \quad (5.1)$$

Donde n es el número de muestras, f_i y \hat{f} representan las frecuencias modales identificadas y reproducidas, respectivamente.

Los valores de RMSE entre las frecuencias reproducidas y de estimación se ilustran en la Tabla 5.13 para comparar los modelos MLRM y ARX. En ambos métodos las frecuencias obtenidas para la estimación dieron buenos resultados ya que los valores bajos del RMSE lo demuestran. Para el caso del muro tipo I la primera y tercera frecuencia se pueden predecir mejor con el modelo ARX ya que presentan un RMSE ligeramente menor. Por otro lado los modelos creados para las frecuencias 2 y 4 se pueden predecir mejor utilizando el método MLRM ya que presentan una buena estimación en tendencia y magnitud. Para el muro tipo II todas las frecuencias se ajustan mejor al modelo de estimación MLRM debido a que presentan un valor bajo del RMSE. Por último en el caso del muro tipo III para las frecuencias 1 y 3 el modelo MLRM tiene un mejor ajuste debido al bajo valor del RMSE y las frecuencias 2 y 4 dieron resultados parecidos de RMSE para ambos modelos. En conclusión para la etapa de la estimación ambos modelos presentan buena aproximación. Sin embargo en algunos casos no se obtuvieron los resultados esperados ya que los modelos consideran el aumento de frecuencias debido al periodo de secado de los muros y esto produce en la estimación una tendencia de subida.

Tabla 5.13 Comparación de los modelos de estimación del MLRM y ARX utilizando el RMSE.

	Modelos	Frecuencias			
		Frecuencia f_1	Frecuencia f_2	Frecuencia f_3	Frecuencia f_4
Muro tipo I	Multiparamétrico	0.039	0.070	0.230	0.142
	ARX	0.029	0.110	0.228	0.163
Muro tipo II	Multiparamétrico	0.098	0.270	0.170	0.514
	ARX	0.102	0.305	0.191	0.600
Muro tipo III	Multiparamétrico	0.075	0.281	0.201	0.620
	ARX	0.120	0.284	0.225	0.625

En la Tabla 5.14 se comparan los resultados de los modelos de regresión multiparamétrica y los modelos ARX entre las frecuencias identificadas y las predictivas utilizando el valor del RMSE. Para el muro tipo I se observa que el modelo ARX es superior en cuanto a ajuste y tendencia para la primera frecuencia esto se puede demostrar por el valor bajo del RMSE. Por otro lado existen mejoras en el ajuste de los modelos MLRM para las frecuencias 2, 3 y 4 ya que el valor del RMSE es menor y se tiene buena estimación tanto en magnitud como tendencia en tendencia. Para el muro tipo II se observa que el modelo MLRM es superior en cuanto a ajuste y tendencia para todas las frecuencias debido a que el RMSE es mucho menor. Las frecuencias 1 y 3 del muro tipo III dieron mejores resultados para el modelo MLRM y en la frecuencia 2 se observa que el modelo ARX es parecido al MLRM en cuanto a tendencia y magnitud. Finalmente la frecuencia 4 tiene valores mayores de RMSE para ambos modelos lo que demuestra que no tiene buena aproximación y la causa tiene que ver con la naturaleza de los datos ya que no se obtuvieron buenos resultados en la medición de frecuencias.

Tabla 5.14 Comparación de los modelos de validación del MLRM y ARX utilizando el RMSE.

	Modelos	Frecuencias			
		Frecuencia f_1	Frecuencia f_2	Frecuencia f_3	Frecuencia f_4
Muro tipo I	Multiparamétrico	0.055	0.081	0.260	0.140
	ARX	0.049	0.109	0.281	0.175
Muro tipo II	Multiparamétrico	0.110	0.290	0.182	0.920
	ARX	0.160	0.360	0.280	1.201
Muro tipo III	Multiparamétrico	0.120	0.321	0.212	1.123
	ARX	0.154	0.325	0.260	1.201

En general de los resultados obtenidos se observa que el método MLRM genera un RMSE ligeramente inferior que el ARX para las frecuencias lo que revela que este modelo tiene una buena precisión en la reproducción de las muestras de entrenamiento y validación. La buena calidad de la reconstrucción estadística de las frecuencias es más clara para las frecuencias bajas que para las altas, esto se comprueba con los valores bajos obtenidos del RMSE. Sin embargo para los modos superiores existe una ligera diferencia entre los modelos de estimación y los predictivos y esto se puede entender porque los datos tienen más variabilidad en las frecuencias más altas. Para los tres muros se concluye que las frecuencias obtenidas para la estimación dieron buenos resultados y para algunas utilizadas en la validación son claras en tendencia y en otros casos son claras en magnitud.

De la misma manera se demuestra que la distribución no uniforme de la temperatura se debe tener en cuenta en la construcción de modelos cuantitativos ya que influyen en el comportamiento de los parámetros dinámicos. Por último como se menciona en la bibliografía la cuantificación de la influencia de la temperatura en las frecuencias modales es esencial en la detección de daños basada en vibraciones.

Capítulo 6

Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros



6.1 Conclusiones

La presente tesis describe la aplicación del monitoreo de la salud estructural para diferentes sistemas estructurales con aplicación en la conservación de monumentos históricos. El trabajo consistió en la ejecución de ensayos de laboratorio en tierra y acero para lo cual primero se evaluó el tiempo de secado de especímenes cilíndricos al interior de un ambiente controlado. Luego se diseñó un espécimen de acero y tres muros de prueba con el fin de evaluar los efectos de los factores ambientales en las propiedades dinámicas de estos sistemas estructurales. A continuación se presentan las conclusiones más importantes en base a los resultados obtenidos.

6.1.1 Evaluación del tiempo de secado en probetas de tierra

De los ensayos realizados en la presente investigación, podemos concluir lo siguiente:

El tiempo considerado para el monitoreo y para la interpretación de resultados fue de siete meses y los datos que se obtuvieron luego de esa fecha ya no se tomaron en cuenta debido a que se abrió la caja y ya no hubo un ambiente controlado.

Se obtuvo una curva exponencial que relacione el contenido de humedad y la resistencia a la compresión de los especímenes de tierra los cuales se pueden usar perfectamente para evaluar el tiempo de secado a diferentes edades.

En conclusión las curvas ajustadas dieron buenos resultados para predecir el comportamiento interno de los factores ambientales en probetas de tierra y así la humedad interna sirvió para evaluar el tiempo de secado al interior de un ambiente controlado.

En la primera semana de monitoreo la humedad al interior de los especímenes de tierra disminuye en un 10%, y conforme transcurre el tiempo va disminuyendo lentamente, lo que garantiza que existe un ambiente controlado.

La temperatura al interior de las probetas no sufre cambios considerables a lo largo del tiempo ya que las pruebas se realizaron al interior de un ambiente controlado, solo se encontró que existe una variación de la temperatura de 0.5°C.

Los valores de humedad y temperatura al interior de las probetas de tierra fueron ajustados a curvas polinómicas con un valor de R^2 de 0.87 y 0.85 respectivamente lo que nos permitió poder definir el comportamiento de los parámetros ambientales a lo largo del tiempo.

6.1.2 Monitoreo dinámico y ambiental de un espécimen de acero

Del monitoreo continuo y automatizado del péndulo invertido de acero podemos concluir lo siguiente:

Se utilizó con gran éxito la identificación automática para determinar y validar la variación a lo largo del tiempo de las primeras tres frecuencias naturales del espécimen de acero cuyos resultados fueron de 5.8Hz, 7.9Hz y 58.8Hz.

Las primeras tres frecuencias del espécimen de acero fueron comparados mediante un modelo analítico, numérico y el obtenido por la identificación automática, encontrando valores parecidos y variaciones mínimas en un rango de 0.1%.

Las tres primeras frecuencias del péndulo de acero presentan una variación mínima que oscilan entre 0.01-0.02%, mientras que la temperatura ambiental varía de 19°C a 24°C, lo que nos asegura que no existe daño estructural.

Las frecuencias naturales del espécimen no sufrieron grandes cambios a lo largo del tiempo debido al efecto de los factores ambientales. Esto se puede entender ya que el péndulo de metal estuvo todo el tiempo al interior del laboratorio y no expuesto al medio ambiente.

Las frecuencias de vibración disminuyeron en un 17% debido al incremento de un peso de 3.4kg por lo que el espécimen de acero se hizo más rígido.

Los resultados del ensayo de calentamiento muestran la disminución de las 3 frecuencias cuando se induce un incremento de temperatura de 12°C, es decir las frecuencias 1, 2 y 3 disminuyeron en 0.09Hz, 0.14Hz y 1.1Hz respectivamente.

Finalmente se demostró experimentalmente la ley constitutiva térmica del acero ya que para cualquier rango de temperatura el módulo de elasticidad disminuye a medida que la temperatura incrementa y por lo tanto las frecuencias disminuyen.

6.1.3 Monitoreo dinámico y ambiental de tres muros de adobe

Se fabricaron unidades de adobe que repliquen las características del material de los empleados en el complejo arqueológico Huaca de la Luna y se utilizaron para construir tres muros de adobe.

En la presente tesis, se construyeron tres muros de adobe y fueron colocados en el laboratorio de estructuras expuestas al medio ambiente para medir continuamente las frecuencias naturales y los factores ambientales (temperatura y humedad). Las correlaciones entre las frecuencias naturales y los factores ambientales se analizan comparativamente. Este trabajo propone cuantificar la variación de las frecuencias modales bajo los efectos ambientales de las construcciones de tierra mediante pruebas preliminares en laboratorio. En contraste con los estudios convencionales que utilizan sólo la temperatura del aire, la presente tesis tiene como objetivo obtener la distribución térmica y de humedad en toda la estructura mediante la colocación de sensores internos.

Un sistema de monitoreo de bajo costo fue instalado en los tres muros de adobe y ha estado midiendo la respuesta dinámica y ambiental durante un periodo de cuatro meses. Los resultados permitieron concluir que los efectos ambientales cambian significativamente la respuesta dinámica de las estructuras.

El sistema de monitoreo continuo nos permitió identificar claramente dos etapas: primero el periodo de secado que abarca aproximadamente dos meses, segundo el periodo en el cual los muros alcanzan su máxima rigidez y las frecuencias se estabilizan.

Durante la primera etapa de secado del sistema de monitoreo se obtuvo que las primeras cuatro frecuencias naturales del muro tipo I varían en 0.9Hz, 4.0Hz, 2.1Hz y 6.2Hz respectivamente, para el muro tipo II varían en 1.0Hz, 1.3Hz, 3.4Hz y 6.9Hz, finalmente para el muro tipo III varían en 1.1Hz, 1.4Hz, 4.2Hz y 8.2Hz.

En la segunda etapa cuando los muros ya se encontraron secos se obtuvo que las primeras cuatro frecuencias naturales del muro tipo I varían en 0.4Hz, 2.0Hz, 0.6Hz y 2.1Hz respectivamente, para el muro tipo II varían en 0.8Hz, 0.9Hz, 3.5Hz y 6.5Hz, finalmente para el muro tipo III varían en 1.0Hz, 1.3Hz, 4.0Hz y 4.1Hz.

La temperatura ambiental cambia en un rango de 16°C a 37°C, lo que puede ser suficiente para influir en la variación de las frecuencias naturales de los muros de adobe. Los resultados demuestran como el incremento de temperatura en el verano cambia las frecuencias naturales en un 0.04%-0.37% por grado Celsius para el muro tipo I, 0.75%-2.74% para el muro tipo II y 0.83%-2.30% para el muro tipo III.

En el caso del muro tipo I se obtuvo un lapso de tiempo de 4 horas entre la máxima temperatura ambiental y la interna, mientras que para los muros tipo II y III este tiempo es más prolongado teniendo valores de 5 y 6 horas respectivamente. En base a estos resultados se demuestra como los muros de mayor espesor (tipo II y III) retienen más el calor durante un tiempo más prolongado ya que las temperaturas registradas en ningún momento son menores a la del muro tipo I.

Las correlaciones obtenidas son demasiado débiles para concluir confiablemente acerca del comportamiento físico que rigen los efectos de la humedad en las frecuencias naturales por lo que no existe una influencia significativa sobre la respuesta dinámica tal como menciona la literatura.

Los coeficientes de R^2 entre las frecuencias y la temperatura interna poseen una correlación casi perfecta y es por este motivo que entre estos parámetros no existe un desfase de tiempo considerable. Por otro lado si existe un desfase de tiempo entre las frecuencias y la temperatura ambiental que está muy relacionado con el espesor del muro.

La relación entre frecuencias y temperatura no puede obtenerse suficientemente utilizando solo la temperatura interna o externa. En conclusión es mejor realizar un análisis de las correlaciones de temperatura tanto interna como externa ya que de esta manera podemos definir qué temperatura considerar y cuál es la más influyente.

Los modelos ARX y MLRM permiten obtener modelos con un ajuste de más del 70% sobre el conjunto de datos de estimación y validación. Finalmente, ambos modelos predicen adecuadamente el comportamiento de la influencia de los factores ambientales.

En los tres muros de adobe los valores estimados de las frecuencias superiores (modo 3 y 4) presentaron una gran variabilidad por lo que no se obtuvieron buenos modelos de predicción.

Se concluye que el corto periodo de monitoreo no es suficiente para tener un modelo adecuado, ya que durante los dos primeros meses se considera el efecto del endurecimiento del adobe. Por lo que debería tenerse un periodo más largo, de por lo menos un año para la calibración y con el fin de tener un modelo más fiable para la predicción de las frecuencias.

A partir de la experiencia con los tres casos de estudio, la metodología propuesta para identificar la influencia de los parámetros ambientales en las propiedades dinámicas es útil y aplicable a estructuras históricas de adobe y de otros materiales.

El estudio de la frecuencia natural es un enfoque fiable para la detección de daños, aunque no se produjeron daños en todo el tiempo de monitoreo, se espera tener mayor información en los meses posteriores e identificar los posibles daños.

6.2 Recomendaciones

En la actualidad se están desarrollando investigaciones en el campo del monitoreo de la salud estructural los cuales se realizan con un equipo multidisciplinario debido a la complejidad de los sistemas que se usan e instalan. Dentro de un trabajo de investigación tan amplio, nuevo e innovador como lo fue éste, se llegaron a adquirir capacidades no solo de la parte de la ingeniería civil sino también de la ingeniería electrónica. Fundamentalmente desde un inicio de la investigación se tuvo que aprender a manipular equipos electrónicos, ensamblar sensores, trabajar con señales, etc. Por este motivo y de acuerdo a los resultados obtenidos se plantearon una serie de recomendaciones para trabajos futuros que impliquen la manipulación de equipos electrónicos en general.

Calibrar los sensores que se pretenden usar y de la misma manera entender adecuadamente ciertos parámetros como precisión, rango de medición, sensibilidad los cuales se pueden encontrar en el *datasheet* de todos los sensores o exigir al fabricante.

Colocar adecuadamente y con cuidado los sensores internos que se van a utilizar durante el proceso constructivo debido a que si se dañan en el futuro pueden dar resultados incoherentes y no acordes con la realidad.

Revisar continuamente el centro de monitoreo ya que pueden existir factores externos que malogren el sistema de adquisición de datos como falta de electricidad, corte de cables, etc.

Se recomienda realizar pruebas preliminares tanto para los equipos de adquisición como para el rendimiento de los sensores ya que como se trata de un sistema de monitoreo continuo estos permanecerán en la intemperie por mucho tiempo e inclusive años.

6.3 Trabajos Futuros

El campo del monitoreo de salud estructural es muy amplio y merece que se le preste una gran atención, mucho más como países como el nuestro que tiene una gran actividad sísmica. En la actualidad en el Perú no se tienen estructuras modernas ni históricas que tengan un sistema de monitoreo continuo, por lo que sería de gran importancia continuar con las investigaciones en este campo y de esa manera poder contribuir a diseñar e implementar sistemas modernos de monitoreo.

Con respecto a los muros de adobe estudiados, realmente se necesitará obtener datos por mucho más tiempo (uno o dos años), debido a que podrían aparecer diversos factores negativos que alteren las propiedades dinámicas y su posterior degradación de la rigidez. En este caso podrían darse eventos sísmicos, eventos climatológicos extremos, o cualquier otro factor negativo que afecten a los muros y que merecen ser estudiados. De la misma manera se pueden hacer otras pruebas como inducir algún tipo de daño (incremento extremo de temperatura, aumento de humedad, etc.) y estudiar cual es la respuesta de la estructura durante su vida útil.

Referencias

- Asghari A. (2009). Characterization of environmental variability in identified dynamic properties of a soil-foundation-structure system. PhD Thesis, University of Southern California, USA.
- ASTM C469/C469M-14. (2014). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM D2166-06. (2006). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. West Conshohocken. ASTM International.
- ASTM D422-63. (2007). Standard Test Method for Particle-size Analysis of Soils, ASTM International.
- ASTM D4318-10. (2010). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International.
- Basoalto, J. (2013). Análisis del efecto de las condiciones ambientales en las propiedades modales de un edificio de hormigón armado. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, FCFM, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Boroschek, R. Bilbao, J. (2015). Evaluation of an automatic selection methodology of model parameters from stability diagrams on a damaged building, 6th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC, Gijon, Spain, pp. 12-14.
- Bui Q.-B., Hans S., Morel J.-C., Do A.-P. (2011). First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings. *Engineering Structures*, vol. 33, pp. 3690-3695.
- Chácara, C., (2013). Evaluación estructural de construcciones históricas en la costa peruana utilizando tecnologías modernas: el caso del hotel "el comercio" en Lima. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Chopra, A.K. (1995). *Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering*. 1st ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Cornwell P.J., Farrar C.R., Doebling S.W., Sohn H. (1999), Environmental variability of modal properties. *Experimental Techniques*, pp. 45-48.
- DIANA (2006). DIANA-9.6 Finite Element Analysis. User's Manual – Release 9.6, TNO, Netherlands.

- Doebling, S.W., C.R. Farrar, M.B. Prime and D.W. Shevitz. (1996). *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*. Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS.
- FC-28. (2016). Humidity sensor. Soil humidity detection sensor module. From amazon.com. <http://www.fasttech.com>.
- Garevski, M., (2013). *Earthquakes and Health Monitoring of Civil Structures*. Springer.
- Guang-Dong Z., Ting-Hua Y. (2014). A Summary Review of Correlations between Temperatures and Vibration Properties of Long-Span Bridges. Hindawi Publishing Corporation, *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 19.
- He X., (2008). *Vibration-Based Damage Identification and Health Monitoring of Civil Structures*. PhD Thesis, University of California, San Diego.
- Johnson R. A., Wichern, D. W. (1992). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall.
- Kodur, V.K.R., Harmathy, T.Z. (2002). *Properties of Building Materials*. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd edition. P.J. DiNunno, National Fire Protection Association, Quincy, MA.
- Ko, J.M., Chak, J.Y., Wang J.Y., Ni Y.Q., Chan T.H.T. (2003). Formulation of an uncertainty model relating modal parameters and environmental factors by using long-term monitoring data. In Liu, S.C., Eds. *Proceedings Smart Structures and Materials*, pp. 298-307.
- Ko, J.M., Ni, Y.Q. (2005). Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures*, vol. 27, pp. 1715-1725.
- Kottegoda, N., Rosso R., (2008). *Applied statistics for civil and environmental engineers*. Blackwell Publishing, Second edition.
- Kulla, J. (2010). *Vibration-Based Structural Health Monitoring under Variable Environmental or Operational Conditions*. Springer Vienna.
- Labview. (2015). *LabVIEW User Manual*. Release 8.0. National Instruments, USA.
- Liu, H., Wang, X., Jiao, Y. (2016). Effect of Temperature Variation on Modal Frequency of Reinforced Concrete Slab and Beam in Cold Regions. Hindawi Publishing Corporation, *Shock and vibration*, pp. 17.
- Ljung, L., (1999). *System Identification: Theory for the User*. Prentice Hall, New Jersey.
- LM-35. (2016). Temperature sensor LM-35. National Semiconductor Corporation. From national.com. <http://www.fasttech.com>.
- López-Cruz I.L., Rojano-Aguilar, A., Ojeda-Bustamante W., Salazar-Moreno R., (2007). ARX models for predicting greenhouse air temperature: a methodology. *Agrociencia*, vol. 41, núm. 2, pp. 181-192.

- Magalhães, F. (2010). Operational modal analysis for testing and monitoring of bridges and special structures. Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, University of Porto, Porto.
- Manual de construcción en adobe. (2010). Edificaciones antisísmicas de adobe. Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS), Lima, Perú.
- Matlab R2013a. (2013). I. The Mathworks, Inc. www.mathworks.com. Massachusetts, United States.
- Miccoli L. Müller U. Fontana P. (2014). Mechanical behavior of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials*, vol. 61, pp. 327-339.
- Montesinos, M. (2016). Caracterización mecánica de componentes estructurales en construcciones arqueológicas de tierra: El caso de Huaca de La Luna. Tesis para obtener el título de Magíster en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Morrison, T. (2008). Advanced Numerical Tool to Analyze Monitoring Data. Master Thesis, Faculty of Engineering, University of Minho, Portugal.
- National Instrument. (2016). Accelerometer PCB393B12. <http://www.pcb.com>.
- National Instrument. (2016). Daq NI 9234. <http://www.ni.com>.
- National Instrument. (2016). LabVIEW 2015. United States.
- National Instrument. (2016). NI USB-6003. <http://www.ni.com>.
- National Instrument. (2016). NI USB-6225. <http://www.ni.com>.
- ONSET (2015). Data Logger. From ONSET.com. <http://www.onsetcomp.com>.
- Proyecto Arqueológico Huaca de la Luna. (2008). Informe técnico. Universidad Nacional de Trujillo: Facultad de Ciencias Sociales.
- Ramos, L.F. (2007). Damage identification on masonry structures based on vibration signatures. PhD Thesis, University of Minho, Guimaraes, Portugal.
- SAP2000, (2005). SAP2000 Advanced User Manuals, Release 14.0, CSI Computers & Structures, Inc.
- SENCICO, (2000). Reglamento nacional de edificaciones – Norma técnica de edificación E.080. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Lima, Perú.
- Tamayo, F., (2014). Métodos de extracción de efectos ambientales en procesos de identificación de sistemas. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, FCFM, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Ubertini F., Comanducci G., Cavalagli N. (2016). Environmental effects on natural frequencies of the San Pietro bell tower in Perugia, Italy, and their removal for structural performance assessment. *Mechanical Systems and Signal Processing, Mathematical Problems in Engineering*. vol. 82, pp. 307-322.

- Uceda, S., Morales, R. (2010). Moche pasado y presente. Patronato Huacas del Valle de Moche, Trujillo, Peru.
- Yan, A. -M., Kerschen, G., De Boe, P. and Golinval, J. -C. (2005). Structural damage diagnosis under varying environmental conditions-Part I: A linear analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 19, pp. 847-864.
- Y. Xia, Y.-L. Xu Y. Xia, Y.-L. Xu, Z.-L. Wei, H.-P. Zhu, and X.-Q. Zhou. (2010). Variation of structural vibration characteristics versus non-uniform temperature distribution. *Engineering Structures*, vol. 33, no. 1, pp. 146 153.
- Zhou H.F., Ni Y.Q., Ko J.M. (2010). Constructing input to neural networks for modeling temperature caused modal variability: Mean temperatures, effective temperatures, and principal components of temperatures. *Engineering Structures*, vol. 32, pp. 1747-1759.
- Zvietcovich, F., Castaneda, B., Perucchio, R., (2015). 3D solid model updating of complex ancient monumental structures based on local geometrical meshes. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 2, pp. 12-27.

