

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**APLICACIÓN DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA PARA EL
DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES HISTÓRICAS
DE ADOBE Y QUINCHA**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Guido Leonardo Silva Mondragón

ASESOR:

Dr. Ing. Rafael Aguilar Velez

Lima, junio, 2020

Resumen

Las propuestas de intervención y restauración que garanticen la conservación de una edificación histórica deben estar orientadas a solucionar los problemas detectados en un diagnóstico estructural previo. El uso de métodos no destructivos durante la ejecución del diagnóstico estructural es recomendable debido a su carácter no invasivo. Dentro de este tipo de métodos se encuentra la termografía infrarroja que tiene la ventaja de proporcionar información en tiempo real y no requerir un contacto directo con la superficie estudiada.

El objetivo de la presente tesis es explorar una herramienta de diagnóstico estructural no destructiva mediante el uso de termografía infrarroja pasiva y activa desde un enfoque cualitativo. Para alcanzar este fin se realizó una revisión bibliográfica de la aplicación de termografía infrarroja en ingeniería civil. Además, se realizaron ensayos de termografía infrarroja pasiva y activa en dos casos de estudio en laboratorio para evaluar las ventajas que proporcionan ambos métodos en la visualización de inserciones y anomalías estructurales. Luego, se formularon protocolos de ensayos de termografía infrarroja pasiva y activa, recolección de datos y post-procesamiento de datos (integración de la termografía infrarroja con fotogrametría). Por último, los protocolos propuestos fueron validados mediante su uso en el diagnóstico estructural de una casona de adobe y quincha del siglo XX ubicada en Lima y la fachada de un módulo de adobe.

Los resultados obtenidos muestran que la termografía infrarroja se presenta como una útil herramienta de diagnóstico estructural para estudiar anomalías superficiales y sub-superficiales, visualizar sistemas estructurales como la quincha y detectar cambios de material. Por otro lado, la integración de termografía infrarroja con fotogrametría demostró ser capaz de proveer información espacial de las anomalías detectadas en los termogramas y posibilita diferenciarlas de irregularidades geométricas. Finalmente, los protocolos propuestos demostraron ser herramientas que facilitan la ejecución de ensayos de termografía infrarroja y que podrían ser empleados por profesionales involucrados en el ámbito del estudio y conservación de patrimonio cultural.

Abstract

Intervention and restoration proposals that guarantee the conservation of a historic building must be aimed at solving the problems detected in a previous structural diagnosis. The use of non-destructive methods during the execution of a structural diagnosis is recommended due to its non-invasive nature. This type of method includes infrared thermography, which has the advantage of providing information in real time and does not require direct contact with the surface being studied.

The objective of this thesis is to explore a non-destructive structural diagnostic tool using passive and active infrared thermography from a qualitative approach. To this end, a bibliographic review of the application of infrared thermography in civil engineering was carried out. In addition, passive and active infrared thermography tests were performed in two laboratory case studies to evaluate the advantages provided by both methods in the visualization of insertions and structural anomalies. Then, protocols for passive and active infrared thermography, data collection and post-processing (integration of infrared thermography with photogrammetry) were formulated. Finally, the proposed protocols were validated through their use in the structural diagnosis of a 20th century adobe and quincha house located in Lima and the façade of an adobe module.

The results indicate that infrared thermography is presented as a useful structural diagnostic tool to study surface and sub-surface anomalies, visualize structural systems such as the quincha and detect material changes. On the other hand, the integration of infrared thermography with photogrammetry proved to be capable of providing spatial information of the anomalies detected in the thermographs and makes it possible to differentiate them from geometric irregularities. Finally, the proposed protocols proved to be tools that facilitate the execution of infrared thermography tests and that could be used by professionals involved in the study and conservation of cultural heritage.

Agradecimientos

Esta tesis no hubiese podido ser concluida sin la contribución de las siguientes personas a las cuales quiero expresar mi eterno agradecimiento:

- Dr. Rafael Aguilar, mi asesor. Por su confianza, tiempo, exigencia y por darme la oportunidad de formar parte del grupo de investigación Engineering & Heritage.
- A mis compañeros del grupo de investigación Engineering & Heritage. Por su amistad, consejos y apoyo en la ejecución de la campaña experimental de esta tesis. Asimismo, por las fructíferas conversaciones sobre nuestras investigaciones y por compartir su conocimiento y experiencia.
- A mis colegas de la PUCP. Por su amistad y por los gratos momentos vividos durante nuestra etapa universitaria.

Finalmente, un agradecimiento especial a mi familia:

- Mis padres Guido Omar y Aleyda y mi hermana Fiorella. Por su amor y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Mi eterno agradecimiento por haberme permitido culminar mi formación académica.

Índice

Resumen	i
Abstract	ii
Agradecimientos	iii
Índice	iv
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	xi
1. Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Hipótesis.....	3
1.4. Justificación.....	4
1.5. Esquema.....	4
2. Capítulo 2: Conceptos generales sobre termografía infrarroja	5
2.1. Introducción.....	6
2.2. Transferencia de calor y radiación infrarroja.....	6
2.2.1. Transferencia de calor.....	6
2.2.2. Radiación infrarroja como base de la termografía infrarroja.....	8
2.3. Funcionamiento de la cámara termográfica.....	9
2.3.1. Características de la cámara termográfica.....	12
2.4. Tipos de termografía y casos de estudio.....	13
2.4.1. Termografía pasiva.....	14
2.4.2. Termografía activa.....	18
2.5. Post-procesamiento de datos.....	28

2.5.1.	Análisis cualitativo.....	28
2.5.2.	Análisis cuantitativo mediante curvas transitorias.....	31
2.5.3.	Integración de fotogrametría con termografía infrarroja	36
3.	Capítulo 3: Aplicación de termografía infrarroja pasiva y activa para la identificación de inserciones estructurales en ensayos de laboratorio	38
3.1.	Introducción.....	39
3.2.	Casos de estudio en laboratorio.....	39
3.2.1.	Bloques de concreto con objetos incluidos	39
3.2.2.	Muro compuesto de varios materiales con objetos incluidos.....	40
3.3.	Equipos y materiales usados.....	41
3.3.1.	Cámara termográfica.....	41
3.3.2.	Cámara digital	42
3.3.3.	Lámparas halógenas	43
3.3.4.	Software para procesamiento de termogramas	43
3.4.	Descripción de los ensayos realizados en laboratorio	44
3.5.	Análisis y discusión de resultados.....	46
3.5.1.	Bloques de concreto con objetos incluidos	46
3.5.2.	Muro compuesto por varios materiales con objetos incluidos.....	47
4.	Capítulo 4: Propuesta y validación de protocolos de termografía pasiva y activa.....	49
4.1.	Introducción.....	50
4.2.	Protocolos de termografía pasiva y activa.....	50
4.2.1.	Protocolos de ensayos de termografía pasiva y activa.....	50
4.2.1.1.	Termografía pasiva.....	50
4.2.1.2.	Termografía activa.....	51
4.2.2.	Protocolo de recolección de datos.....	52
4.2.3.	Protocolo de post-procesamiento de datos.....	53

4.3. Diagnóstico estructural mediante termografía infrarroja de una casona del siglo XX en Lima como caso de estudio de validación	54
4.3.1. Descripción del caso de estudio	54
4.3.2. Descripción de los ensayos	55
4.3.3. Análisis y discusión de resultados.....	57
4.4. Análisis termográfico de la fachada de un módulo de adobe	67
4.4.1. Descripción del caso de estudio	67
4.4.2. Descripción de los ensayos	68
4.4.3. Análisis y discusión de resultados.....	68
4.5. Integración de termografía infrarroja con fotogrametría.....	70
4.5.1. Obtención de datos de entrada	70
4.5.2. Procesamiento de datos	71
5. Capítulo 5: Conclusiones y trabajos futuros	74
5.1. Conclusiones	75
5.2. Trabajos futuros.....	76
Referencias.....	77

Lista de Figuras

Figura 2.1- Fenómenos físicos involucrados en la medición termográfica.	10
Figura 2.2- Balance de energía en una medición termográfica.....	11
Figura 2.3- Diferencia de temperaturas puntuales debido al cambio de los valores de emisividad. (a) Emisividad= 0.95 (b) Emisividad= 0.1.	12
Figura 2.4- Tipos de termografía infrarroja más conocidos.....	14
Figura 2.5- Termografía pasiva: (a) esquema del ensayo y (b) fotografía del ensayo	15
Figura 2.6- Termograma que permite visualización de vano oculto por refacción: (a) imagen visual y (b) termograma	16
Figura 2.7- Termogramas donde se evidencia la diferencia entre una grieta de importancia leve (izquierda) con una de mayor relevancia (derecha)	17
Figura 2.8- Termografía activa: (a) esquema del ensayo y (b) fotografía del ensayo	18
Figura 2.9- Termografía de pulso de una placa compuesta de carbón/epoxy (a) Termogramas PT sin aplicación de técnica de post-procesamiento (b) Termogramas PT con técnica TSR de post-procesamiento.....	20
Figura 2.10- Resultados de PT de defectos en diferentes materiales.....	21
Figura 2.11- Ensayo de un espécimen de concreto fisurado (termograma, curva de temperatura promedio y fotografía): (a) deflexión 1 mm y (b) deflexión de 2mm....	22
Figura 2.12- Esquema de ensayo LT.....	23
Figura 2.13- Termograma obtenido por LT de la inscripción en una iglesia.....	24
Figura 2.14- Resultados de ensayos LT: (a) termograma LT de fase con frecuencia de 1 Hz, (b) termograma LT de fase con frecuencia de 0.5 Hz, (c) termograma LT de fase con frecuencia de 0.33 Hz y (d) termograma LT de fase con frecuencia de 0.2 Hz..	25
Figura 2.15- (a) Termogramas de fase de dicha zona antes de la restauración ($f = 0,015$ Hz) y (b) termogramas de fase después de restauración ($f = 0,0037$ Hz)	26
Figura 2.16- Ensayos LT en inscripción de una iglesia: (a) fotografía digital de parte de la inscripción y (b) termograma PPT con defectos sub-superficiales	27
Figura 2.17- Ensayos SH a plancha de acero: (a) termogramas SH sin aplicación de técnica de post-procesamiento y (b) Termogramas SH con técnica TSR de post-procesamiento	28
Figura 2.18- Mapa térmico 3D.....	29

Figura 2.19- Uso de mapas térmicos 3D: (a) Termograma de mural en el techo y (b) mapa térmico 3-D de termograma.....	30
Figura 2.20- Imágenes asociadas al polinomio logarítmico de grado 7 usado para la regresión TSR: (a) Pulsed Thermography (b) Step-Heating.....	31
Figura 2.21- Curvas transitorias - Transient Curves	32
Figura 2.22- Ecuación diferencial de Fourier.	33
Figura 2.23- Curvas de diferencia de temperatura vs tiempo de observación (incluido el calentamiento) para cada defecto. (a) calentamiento de 10 min y (b) calentamiento de 15 min.....	34
Figura 2.24- Curva de calibración (Profundidad vs $t_{m\acute{a}x}$).	34
Figura 2.25- (a) Curva de tiempo de calentamiento vs máxima diferencia de temperatura y (b) curva de tiempo de calentamiento vs $t_{m\acute{a}x}$	35
Figura 2.26- Integración de fotogrametría y escáner láser con termografía infrarroja: (a) Complejo Monumental San Agustín, (b) Bloque Djinn de Preta y (c) Iglesia de San Vito alla Rivera	37
Figura 3.1- Especímenes de concreto ensayados con termografía activa: (a) Bloque tipo I y (b) Bloque tipo II. Unidades en cm.	40
Figura 3.2- Muro compuesto por distintos materiales con defectos incluidos: (a) sección longitudinal y (b) sección transversal típica. Unidades en cm.....	41
Figura 3.3- Flir Systems ThermaCAM T440: (a) Vista frontal (b) Vista posterior... 41	41
Figura 3.4- Cámara digital Sony de 16 megapíxeles: (a) vista frontal y (b) vista posterior.....	42
Figura 3.5- Lámparas halógenas de 1000 W: (a) Lámparas halógenas montadas en un trípode y (b) ensayo de termografía activa con lámparas halógenas.	43
Figura 3.6- Uso de Software FLIR Tools	44
Figura 3.7- Ejecución de ensayos de termografía activa: (a) Calentamiento de bloque tipo II; (b) Observación con la cámara termográfica de la superficie estudiada; (c) Muro compuesto por varios materiales; (d) Calentamiento de la sección adobe-cantería del muro compuesto por varios materiales.....	45
Figura 3.8- Termogramas del bloque de concreto tipo I: (a) termograma de la cara frontal y (b) termograma de la cara lateral.....	46
Figura 3.9- Termogramas del bloque de concreto tipo II: (a) termograma de la cara frontal y (b) termograma de la cara lateral.....	47

Figura 3.10- Termograma en interfase cantería – adobe: (a) Termografía pasiva; (b) Termografía activa.	48
Figura 3.11- Termogramas en adobe: (a) Termografía pasiva; (b) Termografía activa.	48
Figura 4.1- Protocolo de ensayos de termografía pasiva.	51
Figura 4.2- Protocolo de ensayos de termografía activa.	52
Figura 4.3- Protocolo de recolección de datos.	53
Figura 4.4- Protocolo de post-procesamiento de datos.	54
Figura 4.5- Plano en planta mostrando el uso actual de la edificación en estudio.....	55
Figura 4.6- Plano de materiales inicial.....	56
Figura 4.7- Ensayo termográfico pasivo: (a) Toma con la cámara termográfica y (b) toma con la cámara digital.	57
Figura 4.8- Recopilación de termogramas de muro de quincha de un ambiente.	59
Figura 4.9- Sistema Estructural del muro de quincha.....	60
Figura 4.10- Recopilación de termogramas de muros de quincha del patio.	61
Figura 4.11- Recopilación de termogramas de dinteles.	62
Figura 4.12- Recopilación de termogramas de problemas de humedad.	63
Figura 4.13- Recopilación de termogramas de fisuras y desprendimientos.....	64
Figura 4.14- Recopilación de termogramas de cambio de material.....	65
Figura 4.15- Plano de materiales compatibilizado con resultados termográficos.....	66
Figura 4.16- Plano de anomalías de la casona del siglo XX.....	66
Figura 4.17- Módulo de adobe: (a) vista frontal y (b) vista posterior.....	67
Figura 4.18- Orientación de las vistas del módulo de adobe (Fotografías aéreas). ...	67
Figura 4.19- Ejecución de ensayos de termografía infrarroja en el módulo de adobe: (a) Fachada oeste del módulo de adobe; (b) Calentamiento de la fachada oeste.	68
Figura 4.20- Termogramas de parte inferior derecha de la ventana de la fachada oeste: (a) termografía pasiva y (b) termografía activa.....	69
Figura 4.21- Termogramas de parte superior izquierda de la ventana de la fachada oeste: (a) termografía pasiva y (b) termografía activa.	69
Figura 4.22- Fotografías de la casa de adobe: (a) dron y (b) cámara fotográfica.	70
Figura 4.23- Alineamiento de las fotografías y nube de puntos.	71
Figura 4.24- Obtención del modelo en 3D en Agisoft PhotoScan: (a) nube densa de puntos, (b) enmallado, (c) enmallado con textura de colores obtenidos de las fotografías.	72

Figura 4.25- Fachada oeste del módulo de adobe: (a) Ortoimagen 2D de la fachada oeste; (b) Fachada texturizada con termogramas obtenidos mediante termografía pasiva y (c) Fachada texturizada con termogramas obtenidos mediante termografía activa. 73



Lista de Tablas

Tabla 2.1- Espectro electromagnético.....	9
Tabla 2.2- Parámetros de entrada para el software de simulación.....	33
Tabla 2.3- Determinación de la profundidad de defectos por comparación de los $t_{m\acute{a}x}$ experimentales con la curva de calibración.	36
Tabla 3.1- Especificaciones técnicas de la cámara termográfica Flir Systems ThermaCAM T440	42



Capítulo 1: Introducción



1.1. Introducción

El uso de métodos no destructivos se ha incrementado en las últimas décadas debido a que no requieren de una intrusión en la estructura en estudio. La termografía infrarroja es un tipo de ensayo no destructivo empleado para la ejecución de estudios de diagnóstico estructural. Su aplicación en este campo de estudio tiene dos ventajas importantes: (i) la duración del ensayo es corta y (2) proporciona la información de distribución de temperaturas en una imagen en el rango infrarrojo (termograma) (González, 2006). Estos termogramas pueden ser empleados para realizar un diagnóstico de manera directa. No obstante, también es posible extraer la información de distribución de temperaturas a través de programas de post-procesamiento de datos (Krenzinger, 2006) para ejecutar un análisis cualitativo del defecto observado a través de mapas térmicos 3D (Kordatos et al., 2013) o cuantitativo mediante curvas transitorias (Maierhofer et al., 2006).

La termografía infrarroja ha demostrado una amplia gama de usos dentro del ámbito de la ingeniería civil. Por ejemplo, su uso ha permitido la detección de anomalías estructurales tales como grietas o fisuras (Aggelis et al., 2010) y una mejor visualización de desprendimientos de revestimiento de muros (Sakagami, 2002). Asimismo, este método también ha demostrado ser capaz de detectar anomalías térmicas tales como pérdida de aislamiento térmico y problemas de humedad (Bilotta, 2013). Por último, también se puede destacar la capacidad de la termografía infrarroja en la caracterización de materiales y técnicas constructivas en edificaciones (Pérez-Sánchez, 2016).

Como se ha observado, la termografía infrarroja se presenta como un método no destructivo atractivo dada la diversidad de defectos observables, la rapidez de ejecución de los ensayos en campo y su bajo costo de operación. Por lo tanto, sería de gran ayuda para los ingenieros civiles involucrados en el área de la conservación de edificios patrimoniales contar con un protocolo de ensayos de termografía infrarroja que incluya protocolos del procedimiento del ensayo, recolección de datos y el post-procesamiento de la información obtenida.

En esta tesis se plantearon precisamente una serie de actividades para desarrollar estos protocolos de ensayos de termografía infrarroja. Primero se realizó una revisión teórica del principio físico que gobierna la termografía y se abordó el funcionamiento de la

cámara termográfica. Además, se documentaron los tipos más importantes de termografía con sus respectivos casos de aplicación. Luego, se exploraron las ventajas y limitaciones de la termografía infrarroja en la detección de anomalías estructurales y térmicas a través de dos casos de estudio en laboratorio. Posteriormente, como resultado de la experiencia ganada en la investigación en laboratorio se propusieron los protocolos de ensayo, recolección de datos y post-procesamiento de datos. Finalmente, los protocolos propuestos fueron validados a través de su aplicación en el diagnóstico estructural de una casona de adobe y quincha del siglo XX en Lima y la fachada de un módulo de adobe.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general del proyecto es explorar una herramienta de diagnóstico estructural no destructiva mediante el uso de termografía pasiva y activa desde un enfoque cualitativo.

1.2.2. Objetivos específicos

- i. Documentar los distintos tipos de termografía existentes y sus aplicaciones en el ámbito de la ingeniería civil
- ii. Estudiar las ventajas y limitaciones del uso de termografía pasiva y activa a través del estudio en laboratorio de un muro compuesto por varios materiales y bloques de concreto de características conocidas.
- iii. Proponer una metodología de ensayos de termografía para el diagnóstico estructural que comprende protocolos de ensayo, recolección de datos y post-procesamiento de datos
- iv. Validar la metodología propuesta a través de su aplicación en el diagnóstico estructural de una casona de adobe y quincha del siglo XX en Lima y una fachada de un módulo de adobe

1.3. Hipótesis

Mediante el uso de termografía pasiva y activa como herramienta de diagnóstico estructural es posible la detección de anomalías, defectos superficiales y sub-superficiales, así como, el reconocimiento de materiales y elementos usados en la construcción de edificaciones patrimoniales de adobe y quincha.

1.4. Justificación

La importancia de la presente tesis es verificar la posibilidad de efectuar un diagnóstico estructural en edificaciones de adobe y quincha mediante el uso de termografía pasiva y activa. La comprobación de la hipótesis tendría un impacto positivo para los profesionales dedicados al estudio y conservación de patrimonio cultural debido a que tendrían a la termografía infrarroja como una herramienta confiable y no destructiva para estudiar un edificio histórico. Además, permitiría reducir significativamente el número de muestras invasivas necesarias.

1.5. Esquema

La presente tesis está compuesta por cinco capítulos. El capítulo 1 consiste en una introducción general a la tesis. Se presentan el objetivo general y los objetivos específicos, así como la hipótesis y justificación de la tesis. En el capítulo 2 se introducen los principios físicos que gobiernan la termografía infrarroja. Además, se expone una documentación del estado del arte de la termografía en ingeniería civil tanto en campo como en laboratorio. En el capítulo 3 se describen los dos casos de estudio en laboratorio que se emplearon para evaluar el uso de la termografía infrarroja como herramienta de diagnóstico estructural. Además, se describen los equipos, materiales y herramientas usados en las campañas experimentales. Finalmente, se muestran los resultados de los ensayos, incluyendo un análisis y discusión de los mismos. El capítulo 4 presenta la metodología propuesta de ensayos de termografía infrarroja que consiste en protocolos de ensayo de termografía pasiva y activa, un protocolo de recolección de datos y un protocolo de post-procesamiento de datos (integración de la termografía infrarroja con fotogrametría). Asimismo, se muestra la validación de los protocolos anteriormente descritos mediante su aplicación en el diagnóstico estructural de una casona de adobe y quincha del siglo XX en Lima y una fachada de un módulo de adobe ubicado en la PUCP. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y se sugieren los trabajos futuros que se pueden desprender de esta tesis.

Capítulo 2: Conceptos generales sobre termografía infrarroja

Resumen. En el presente capítulo se presentan los conceptos básicos que permiten el correcto desarrollo de un ensayo termográfico. Primero, se describen los mecanismos de transferencias de calor, haciendo énfasis en la radiación infrarroja. Luego, se exponen el funcionamiento y las características de la cámara termográfica. En este punto también se explican los fenómenos físicos involucrados en un ensayo de termografía infrarroja. Luego, se reportan casos de estudios de termografía infrarroja pasiva y activa tanto en campo como en laboratorio enfocados al diagnóstico estructural de edificaciones y la detección de inserciones de objetos. Finalmente, se muestran metodologías de post-procesamiento de información termográfica como mapas térmicos 3D, curvas transitorias y su integración con fotogrametría. La revisión de literatura ha permitido concluir que la termografía infrarroja es un método no destructivo que obtiene información de la distribución de temperatura superficial de un objeto. El contraste térmico observado en un termograma puede representar alguna anomalía estructural, térmica o la presencia de algún material distinto. La termografía activa posee diferentes tipos en función de la fuente de calor controlada empleada durante el ensayo, la duración del calentamiento y condiciones de observación de la superficie. Los tipos de termografía activa más relevantes son la termografía de pulso (PT), demodulación (LT), fase pulsada (PPT) y pulso largo (SH). Por último, se concluye que la integración de la termografía infrarroja y fotogrametría tiene un gran potencial en la documentación del diagnóstico estructural de edificaciones por la información espacial que provee a las anomalías detectadas.

2.1. Introducción

Una de las ventajas de la termografía infrarroja es su rápida y fácil aplicación. Sin embargo, esto no involucra afirmar que esta herramienta no destructiva involucra procesos y fenómenos sencillos. Como afirmó Balageas (2007), es indispensable un adecuado entrenamiento y conocimiento básico de los principios de radiaciones y transferencias de calor para el uso profesional de la cámara termográfica y sus accesorios y la ejecución de una buena interpretación de resultados. Por lo tanto, el objetivo de este capítulo es proveer estos conceptos básicos sobre transferencia de calor, fenómenos físicos involucrados en un ensayo termográfico y el funcionamiento de la cámara termográfica. Asimismo, se reportan casos de estudios de termografía infrarroja pasiva y activa tanto en campo como en laboratorio enfocados en el diagnóstico estructural de edificaciones y detección de objetos a profundidad para analizar los resultados que se pueden obtener mediante el uso de esta herramienta. Finalmente, se describen las técnicas de post-procesamiento de datos termográficas más empleadas.

2.2. Transferencia de calor y radiación infrarroja

2.2.1. Transferencia de calor

La energía térmica es una de las propiedades más importantes de los cuerpos y objetos. Esta afirmación puede ser sustentada en las actividades que se realizan para medir este parámetro en diversas industrias. Por ejemplo, en el campo de la ingeniería civil, es común la medición de la temperatura del concreto que va a ser colocado en obra, cuantificación de la temperatura media del ambiente para estimar evaporación del agua en un embalse o la estimación de las gradientes de temperatura para estimar deformaciones en elementos estructurales. Por lo tanto, la medición del calor ha sido y será una actividad de importancia dentro del ejercicio de la ingeniería civil, así como en la vida cotidiana.

Antes de mencionar los métodos de medición del calor y los mecanismos de transferencia, es vital conocer cuál es la diferencia entre temperatura y calor, y la relación que tienen con la energía térmica. Según González (2006), “el calor es la energía térmica total en una sustancia o cuerpo, por otro lado, su temperatura es una medida de la energía térmica media”. Además, estos dos parámetros que están relacionados con el concepto de la energía térmica se diferencian por la forma de

cuantificarlos. El calor se suele medir en Joule, mientras que la temperatura, según el Sistema Internacional, se mide en grados Kelvin; sin embargo, en Perú es frecuente usar los grados Celsius.

Por otro lado, un fenómeno que debe ser entendido a cabalidad para comprender el proceso que involucra un ensayo termográfico es la transferencia de calor y sus modos. Una definición simple de la transferencia de calor es dada por Icropera (1999) que la describe como “la energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura”. En otras palabras, la transferencia de calor es la entrega o pérdida de energía térmica por la presencia de un gradiente de temperatura debido a la interacción de un cuerpo u objeto con su entorno. Como se puede inferir, el estudio de la transferencia de calor es sumamente complejo, es por eso que se la divide en tres modos o mecanismos: conducción, convección y radiación.

Primero, la conducción es el mecanismo de transmisión de calor exclusivo de los sólidos o fluidos en reposo donde el movimiento de las partículas ocurre a nivel microscópico). Este modo de transferencia ocurre cuando existe un gradiente de temperatura, donde el calor viaja de forma contraria a dicho gradiente, en otras palabras, la cesión de energía se da desde las moléculas de altas temperaturas hacia las de más bajas temperaturas (Esplugas y Chamarro, 2005). El fenómeno de conducción está descrito por la Ley de Fourier, que relaciona la densidad de flujo de calor y el gradiente de temperatura de manera directamente proporcional mediante una constante denominada coeficiente de conductividad térmica.

Por otro lado, el modo de convección se compone de dos mecanismos que ocurren al mismo tiempo: (i) transferencia de calor debido al movimiento a nivel micro de moléculas (conducción) y (ii) transmisión de calor debido al movimiento a nivel macro de porciones de fluidos (Kreith et al., 2012). Por lo tanto, este modo de transferencia ocurre cuando un sólido o un fluido se encuentra en movimiento.

El tercer modo de transferencia conocido como radiación será explicado a profundidad en el siguiente punto del presente documento debido a su importancia, ya que este mecanismo de transmisión de calor es la base de la termografía infrarroja. Como mencionó Balageas (2007), para realizar un adecuado uso de la termografía es necesaria una “adecuada formación y un conocimiento básico de los principios de radiación y transferencia de calor”. Por otro lado, también es vital diferenciar la

radiación térmica de los otros componentes del espectro electromagnético, ya que, se debe reconocer qué rango de longitudes de onda se captan con la cámara termográfica, para entender de manera correcta el fenómeno que se está observando.

2.2.2. Radiación infrarroja como base de la termografía infrarroja

La radiación es el tercer modo de transferencia de calor y es definida como la “energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita” (Incropera, 1999). A diferencia de los modos de transferencia anteriores (conducción y convección), la radiación no depende de la presencia de un gradiente de temperatura, sino del nivel de temperatura del cuerpo u objeto y, además, se transmite a través de ondas electromagnéticas (Esplugas y Chamarro, 2005). La temperatura se puede medir a través de la radiación sin la necesidad de realizar un contacto con la superficie del objeto debido a que la transferencia de calor se realiza mediante ondas electromagnéticas. Tradicionalmente la cuantificación de la temperatura se ha realizado con métodos que requieren un contacto con la superficie del objeto estudiado. Por ejemplo, los termómetros se basan en una medida indirecta de la temperatura a través de la variación térmica de un material que alcanza el equilibrio térmico luego de colocarlo en contacto con el objeto o cuerpo inspeccionado (González, 2006). Este tipo de mediciones tradicionales se basan en el mecanismo de conducción, donde la temperatura viaja desde los objetos de mayor temperatura a los de más bajas temperaturas. No obstante, el concepto de una medición remota o sin contacto de la temperatura es posible gracias a la radiación térmica, cuya longitud de onda va desde los 0.1 μm hasta los 100 μm . (Esplugas y Chamarro, 2005). La tabla 2.1 presenta el rango que comprende la radiación térmica en el espectro de radiación electromagnético. La radiación térmica está modelada por la Ley de Planck, que afirma que mientras mayor temperatura tenga un cuerpo, mayor radiación emitirá.

Como se puede observar en la tabla 2.1, la radiación térmica abarca la radiación infrarroja, la luz visible y una parte de la radiación ultravioleta (Adrover et al., 2010). Sin embargo, las cámaras termográficas se basan en la captación de solo una parte del espectro de la radiación térmica, en particular de una porción de la radiación infrarroja. Por esta razón, el método es conocido como termografía infrarroja. Asimismo, como se explicará más adelante, las cámaras termográficas pueden ser diseñadas de tal manera que capten cierto tipo de radiación infrarroja. Por ejemplo, hay cámaras que solo captan radiación en el infrarrojo cercano; sin embargo, es importante acotar que

la mayoría de las cámaras infrarrojas pueden recibir información en el infrarrojo cercano y medio (un rango de 0.35 μm a 14 μm).

Tabla 2.1- Espectro electromagnético (Adrover et. al, 2010)

Tipo de onda electromagnética	Longitud de onda	Frecuencia	Energía
Rayos gamma	< 10 pm	> 30,0x10 ¹⁸ Hz	> 20·10 ⁻¹⁵ J
Rayos x	< 10 nm	> 30,0x10 ¹⁵ Hz	> 20·10 ⁻¹⁸ J
Ultravioleta Extremo	< 200 nm	> 1,5x10 ¹⁵ Hz	> 993·10 ⁻²¹ J
Ultravioleta Cercano	< 380 nm	> 7,89x10 ¹⁴ Hz	> 523·10 ⁻²¹ J
Luz Visible	< 780 nm	> 384x10 ¹² Hz	> 255·10 ⁻²¹ J
Infrarrojo Cercano	< 2.5 μm	> 120x10 ¹² Hz	> 79·10 ⁻²¹ J
Infrarrojo Medio	< 50 μm	> 6,00x10 ¹² Hz	> 4·10 ⁻²¹ J
Infrarrojo Lejano	< 1 mm	> 300x10 ⁹ Hz	> 200·10 ⁻²⁴ J
Microondas	< 30 cm	> 3x10 ⁸ Hz ^{n. 1}	> 2·10 ⁻²⁴ J
Ultra Alta Frecuencia Radio	< 1 m	> 300x10 ⁶ Hz	> 19.8·10 ⁻²⁶ J
Muy Alta Frecuencia Radio	< 10 m	> 30x10 ⁶ Hz	> 19.8·10 ⁻²⁸ J
Onda Corta Radio	< 180 m	> 1,7x10 ⁶ Hz	> 11.22·10 ⁻²⁸ J
Onda Media (AM) Radio	< 650 m	> 650x10 ³ Hz	> 42.9·10 ⁻²⁹ J
Onda Larga Radio	< 10 km	> 30x10 ³ Hz	> 19.8·10 ⁻³⁰ J
Muy Baja Frecuencia Radia	> 10 km	< 30x10 ³ Hz	< 19.8·10 ⁻³⁰ J

2.3. Funcionamiento de la cámara termográfica

La cámara termográfica es el equipo con el que se ejecuta un ensayo de termografía infrarroja. Esta cámara capta la radiación térmica que los objetos emiten por estar a una temperatura mayor a los 0° K. Esta captación de la radiación térmica efectuada por la cámara solo se da en una pequeña porción de todo el rango térmico. Usualmente este rango de captación se encuentra en “dos bandas: de 2 a 5.6 μm y de 8 a 14 μm , las cuales se eligen porque la absorción atmosférica en estas longitudes de onda es menor” (Flores y Hongn, 2012). Balaras y Argiriou (2002), también mencionan la importancia de limitar la detección en estos rangos por la presencia de partículas en la atmósfera como vapor de agua, moléculas de dióxido de carbono u ozono. Estas partículas pueden atenuar la radiación emitida por el objeto e derivar en una pérdida de la energía transmitida desde el objeto estudiado hasta la cámara termográfica.

Las cámaras termográficas se pueden clasificar por el rango de longitud de onda que pueden captar. Las cámaras termográficas pueden ser de onda corta (SWIR) de 0.35 a 2.5 μm , banda media (MWIR) de 3.3 a 5 μm y de banda larga (LWIR) de 8 a 14 μm .

Por otro lado, la medición termográfica involucra una gran complejidad, ya que la cámara termográfica no solo recibe radiación del objeto estudiado, sino también recibe energía térmica de los objetos a su alrededor, como fuentes de calor externas y la misma atmósfera. Balageas (2007) afirma que esta complejidad proviene de la naturaleza física de la medición de la cámara (que en sí misma ya es un proceso complejo), la complejidad del objeto observado y la existencia de transferencia de calor entre el objeto o sistema estudiado y el medioambiente que lo rodea. Esta transferencia de calor puede ser de forma controlada (en el caso de la termografía activa con presencia de un estímulo externo controlado por el operador) o independiente (en el caso de la termografía pasiva en condiciones ambientales). La Figura 2.1 ilustra la complejidad del ensayo termográfico y todos los mecanismos de transferencia de calor involucrados.

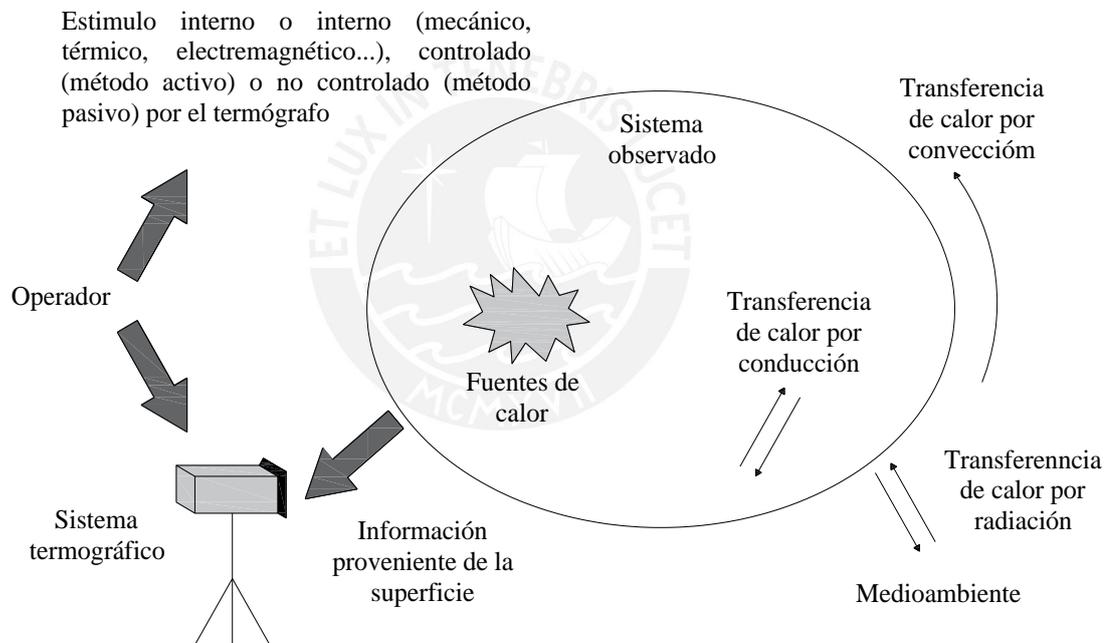


Figura 2.1- Fenómenos físicos involucrados en la medición termográfica. Adaptado de Balageas (2007).

La captación de la radiación térmica que realizan las cámaras termográfica es realizada por una matriz de sensores llamados Focal Plane Array o FPA. Estos dispositivos son transductores eléctricos pues reciben energía infrarroja y arrojan una señal eléctrica que usualmente es una tensión o voltaje (Larsen y Hongn, 2012) y su cantidad define el tamaño (número de píxeles) de la imagen (Balageas, 2007). Asimismo, existen dos tipos de FPA. Los FPA pueden ser refrigerados (detectores cuánticos) y no refrigerados (microbolómetros). Los primeros permiten tener una tasa de actualización de centenares de cuadros por segundo, mientras que en los segundos la tasa de

actualización se limita a 25 Hz al basarse en un efecto fotoconductor (termómetros), (Balageas, 2007).

Como se mencionó anteriormente, cuando se realiza un ensayo termográfico no solo se observa al objeto de interés, sino que se analiza todo un sistema complejo como el mostrado en la Figura 2.1. Por lo tanto, el aporte de la radiación térmica que recibe la cámara termográfica se puede describir mediante tres componentes: la radiación proveniente del objeto estudiado a causa de su temperatura (T_{objeto}), radiación del entorno del sistema y reflejada por el objeto de estudio a temperatura (T_{entorno}) y, por último, la radiación emitida por el mismo aire a temperatura (T_{aire}) (Gaussorgues, 1981). A continuación, se presenta una figura que ilustra lo anteriormente explicado.

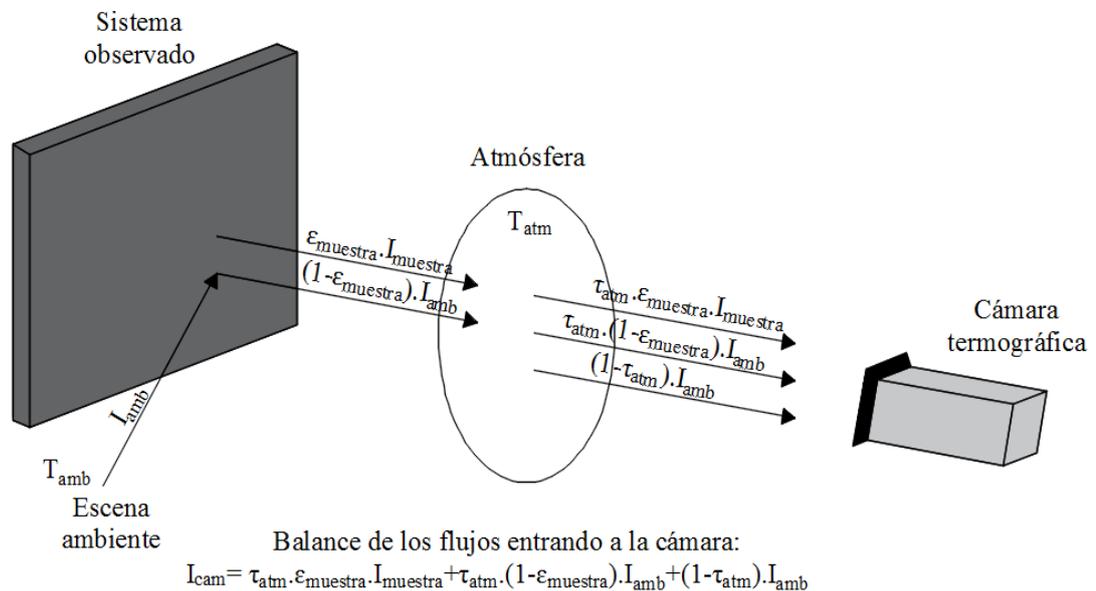


Figura 2.2- Balance de energía en una medición termográfica. Adaptado de Balageas (2007).

La ecuación mostrada en la Figura 2.2 es conocida como la ecuación de balance de energía. Esta ecuación representa mediante un modelo matemático el funcionamiento de la cámara termográfica y los parámetros que influyen en la señal eléctrica producida por la cámara debida a la radiación térmica recibida.

Luego de obtener la señal de eléctrica de cada sensor de la matriz, las señales son convertidas a temperatura usando la ecuación de balance de energía a través del software de la cámara termográfica. Finalmente, todos estos resultados de temperatura de la matriz de sensores son presentados de manera gráfica a través de un termograma. La temperatura de cada píxel está representada por una escala cromática o de grises en el termograma.

La ecuación de balance de energía de la cámara termográfica necesita algunos parámetros de entrada para su solución. Estos parámetros que deben ser introducidos a la cámara termográfica son la transmitancia del aire, la emisividad y la temperatura del aire. Según Flores y Hongn (2014), el valor de transmitancia del aire se puede asumir como 1 ($\tau_{\text{aire}}=1$) cuando existe bajo contenido de humedad y una atmósfera despejada. Esto se debe a que esta propiedad radiante cuantifica qué porción del calor que incide en un cuerpo no se refleja, ni se absorbe, solo se transmite a través de él (Adrover et al., 2010). Además, cuando no existen fuentes de radiación cercanas al objeto estudiado, la temperatura del aire se puede asumir igual a la temperatura del entorno ($T_{\text{entorno}} \cong T_{\text{aire}}$). Finalmente, el valor de emisividad correspondiente a la ecuación de balance de energía, está relacionada con la capacidad de un objeto de emitir radiación en comparación con un cuerpo negro ideal (cuerpo que absorbe todo el calor que recibe). El valor de emisividad, así como el de transmitancia, varía de 0 a 1. Este parámetro es una característica superficial que varía según el objeto observado, usualmente todos los materiales de construcción tienen valores superiores a 0.8 (Flores y Hongn, 2014). Como se muestra en las figuras 2.3a y 2.3b, la introducción de un valor incorrecto de emisividad conduce a una gran variación en la medición de temperaturas.

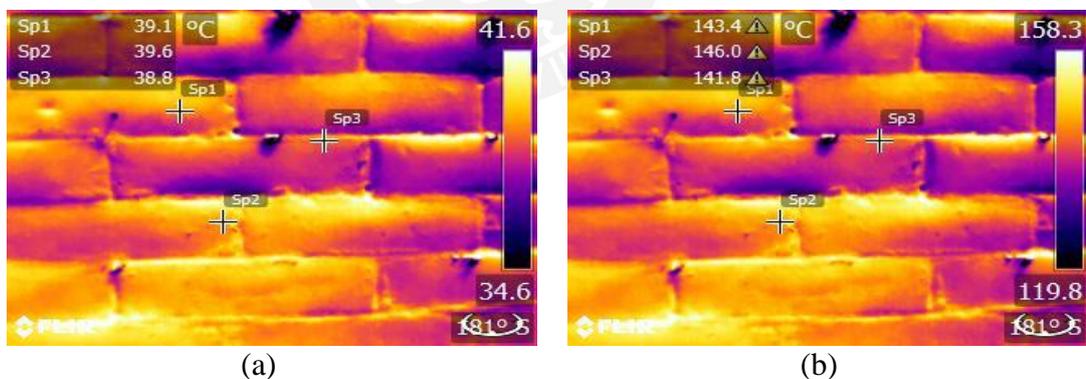


Figura 2.3- Diferencia de temperaturas puntuales debido al cambio de los valores de emisividad. (a) Emisividad= 0.95 (b) Emisividad= 0.1.

2.3.1. Características de la cámara termográfica

Una de las principales características de las cámaras termográficas es su rango de captación del espectro infrarrojo. Como se mencionó en líneas anteriores, estas se pueden clasificar en base a esta característica en cámaras de onda corta (SWIR), banda media (MWIR) y banda larga (LWIR).

Sin embargo, también existen otras características importantes de la cámara termográfica como la sensibilidad térmica, precisión, resolución espacial y frecuencia de la imagen (Balageas, 2007). Una correcta interpretación de estas características será vital en la elección de la cámara termográfica ideal para un eventual ensayo termográfico. Cabe resaltar que estas características suelen presentarse dentro de las especificaciones técnicas de las cámaras termográficas disponibles en el mercado. La sensibilidad térmica o Noise Equivalente Temperature Difference indica la mínima diferencia de temperatura que la cámara termográfica puede registrar entre dos píxeles. Se puede deducir que mientras más bajo sea el valor de la sensibilidad térmica o NETD mejor será el contraste térmico en la superficie del objeto o cuerpo estudiado (Balageas, 2007). La precisión se refiere al margen de error que tiene la medición de temperatura que realiza la cámara termográfica con respecto a la temperatura real (Balageas, 2007). Por otro lado, la resolución espacial o FOV es el área cubierta por un sensor remoto en un determinado momento y depende del tamaño del detector y del lente de la cámara (Balageas, 2007). Finalmente, la frecuencia de la imagen es la tasa de actualización de las imágenes en tiempo real y se mide en Hz.

2.4. Tipos de termografía y casos de estudio

La termografía es definida como un “método no destructivo que permite determinar la distribución superficial de la temperatura del área a analizar” (Balaras y Argiriou, 2002). Esta distribución superficial es representada gráficamente a través de termogramas obtenidos mediante el uso de las cámaras termográficas. Estas cámaras termográficas captan la radiación infrarroja emitida por los objetos, pues “todos los materiales con temperaturas mayores al cero absoluto emiten energía en forma de radiación” (Flores y Hongn, 2012).

En la actualidad existen diversos tipos de termografía que pueden ser aplicados en la ingeniería civil como herramientas de diagnóstico estructural. Por ejemplo, posibilitan la identificación de materiales que se usaron durante el proceso constructivo de alguna edificación o la detección de anomalías estructurales y térmicas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la principal limitación de la termografía es que solo permite la observación de defectos o anomalías superficiales o sub-superficiales. Algunos autores aducen que la termografía infrarroja detecta defectos hasta una profundidad de 10 cm (Maierhofer et al., 2009).

Existen dos enfoques de termografía infrarroja. La principal diferencia es la presencia de un estímulo externo. En el caso de la termografía pasiva, la medición de la distribución de temperaturas de una estructura se realiza en condiciones normales, es decir, sin estímulo externo controlado (Kylili et al., 2014). Por otro lado, si existe una excitación producida por una lámpara, radiador o alguna fuente de calor controlada, la termografía es denominada activa. Debido a la gran variedad de fuentes de energía con la que se puede producir calor, la termografía activa, a su vez, tiene diferentes variantes, clasificadas en base a la duración y tipo de calor generado. De acuerdo a Kylili et al. (2014), los principales tipos de termografía activa son la termografía Lock-In (LT) y la termografía de pulso (PT). Sin embargo, diversas investigaciones hacen referencia a otros tipos de termografía de igual importancia como la termografía de calentamiento graduado (Kordatos, 2013), la termografía de pulso largo (SH) (Balageas, 2014) y la termografía de fase pulsada (PPT) (Maldague, 2002).

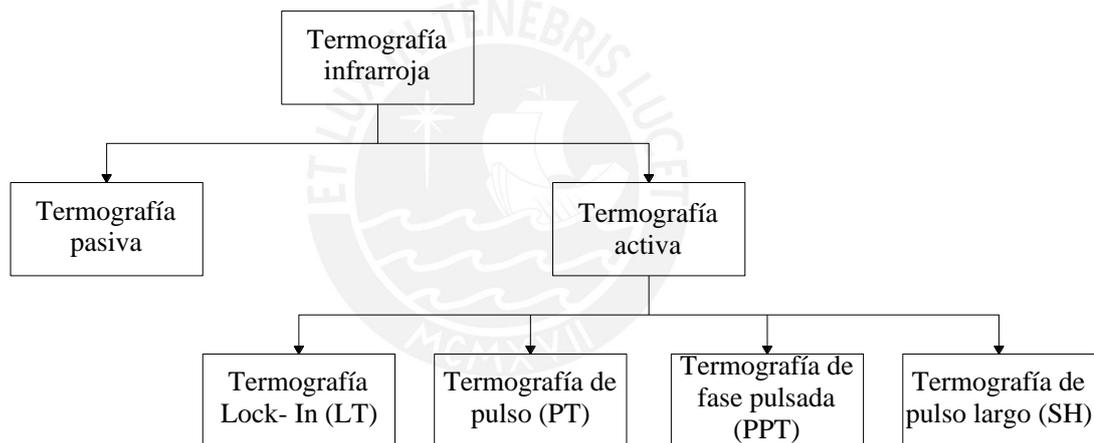


Figura 2.4- Tipos de termografía infrarroja más conocidos (Kylili et al. (2014), Balageas (2014) y Maldague (2002)).

2.4.1. Termografía pasiva

Según Kylili et al. (2014), la termografía pasiva usualmente es usada en el ámbito de la ingeniería civil como herramienta de análisis cualitativo y su aplicación se limita a la localización de anomalías térmicas. Esto posibilita la identificación de problemas tales como deficiencias en el aislamiento térmico de edificaciones (puentes térmicos) y problemas de humedad en pinturas o mampostería. Además, existe la posibilidad de realizar una caracterización de materiales en edificios y monumentos históricos. A continuación, se muestra el esquema usual de un ensayo de termografía pasiva (Figura 2.5a). Como se puede observar en la Figura 2.5b, este tipo de termografía se realiza en

condiciones ambientales, en otras palabras, sin algún tipo de estímulo externo de calentamiento controlado.

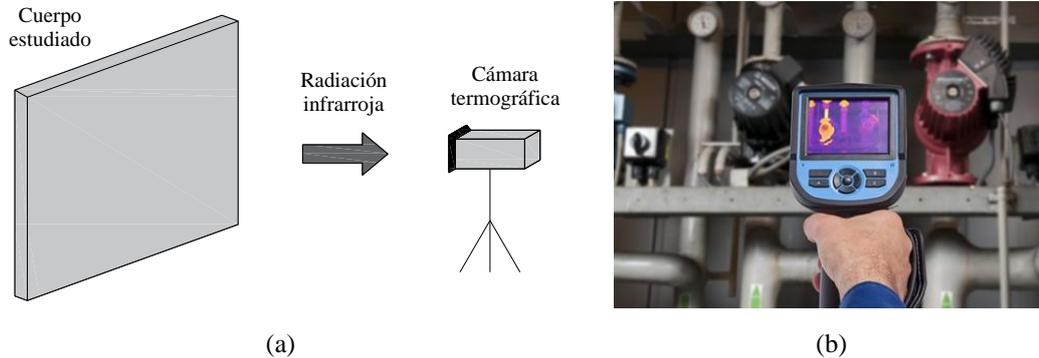


Figura 2.5- Termografía pasiva: (a) esquema del ensayo y (b) fotografía del ensayo (<http://www.skf.com/uk/products/condition-monitoring/basic-condition-monitoring-products/thermal-cameras/thermography/index.html>).

Para demostrar la importancia del uso de la termografía pasiva dentro del ámbito de la ingeniería civil se citarán tres casos de aplicación. Estos casos de estudio se enfocaron en la caracterización de materiales y la detección de anomalías estructurales y térmicas. Se describirá la metodología usada, equipos empleados y las conclusiones de cada trabajo, con el fin de documentar los casos de aplicación para que en un futuro puedan ser replicados de manera sencilla.

Un caso de estudio donde se pudo comprobar la utilidad de la termografía infrarroja pasiva fue el realizado por Cañas, Martín y González (2003). El objetivo de este estudio fue el diagnóstico estructural de edificaciones rurales para su reutilización. Los autores emplearon la termografía infrarroja pasiva como herramienta de diagnóstico estructural primario para evaluar las fachadas exteriores. Los ensayos termográficos se realizaron en la tarde-noche del 26 de marzo y el amanecer del 27 para evitar el ocultamiento de anomalías producto de la incidencia de la radiación solar. El equipo empleado fue una cámara ThermaCAM SC 2000 y ThermaCAM Researcher 2001 (software de post procesamiento de datos), ambos de Flir Systems. Los resultados más importantes del estudio fueron la identificación de vanos ocultos por las diferentes remodelaciones de los edificios rurales antiguos (ver Figura 2.6) y distinción de los materiales de construcción (entre mampostería de piedra y adobe). Además, se identificaron juntas estructurales en las fachadas exteriores y se visualizaron los elementos portantes. Por último, las anomalías térmicas observadas fueron zonas húmedas, pérdidas de calor y zonas de acumulación de calor (Cañas et al., 2003).

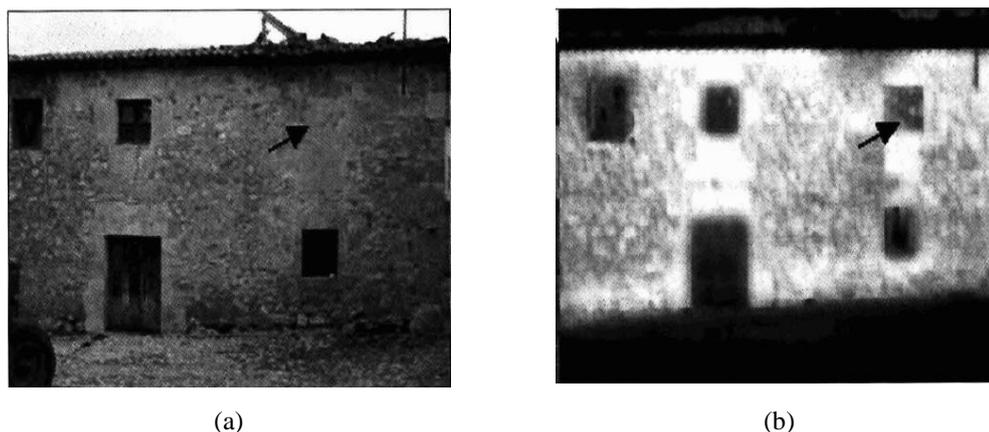


Figura 2.6- Termograma que permite visualización de vano oculto por refacción: (a) imagen visual y (b) termograma (Cañas et al., 2003).

Por otro lado, Pérez-Sánchez y Piedecausa-García (2016) ejecutaron otra investigación empleando termografía pasiva. El objetivo principal de su investigación fue demostrar que con el uso de termografía infrarroja se puede detectar sistemas constructivos en edificios históricos y caracterizar los materiales de construcción empleados. Además, los autores se propusieron demostrar que este método también permite el estudio de la disposición constructiva de edificaciones históricas, la diferenciación de elementos originales/restaurados y su estado de conservación. El estudio se enfocó en las cúpulas de ladrillo de los templos de Alicante (España, siglo 17 al 19). La metodología empleada por Pérez-Sánchez y Piedecausa-García (2016) en este caso de estudio se describirá a detalle. Primero, se procedió a tomar datos geométricos y termográficos. Luego, se recolectó, analizó y comparó los datos obtenidos en campo con documentación del proyecto original y de refacciones. Por último, se llegó a conclusiones sobre la confiabilidad de los datos obtenidos a través del análisis termográfico. Lo interesante de esta investigación es el énfasis que hace en recolectar otro tipo de información además de los termogramas como croquis acotados a mano alzada y fotografías digitales. Asimismo, se recomendó realizar una revisión bibliográfica en municipios, fuentes documentales y proyectos de restauración para efectuar una buena interpretación de los termogramas obtenidos (Pérez-Sánchez y Piedecausa-García, 2016). Para la ejecución de todo lo propuesto en la metodología, se utilizó una cámara termográfica ThermaCAM P25 de Flir Systems, distanciómetros (Leica Disto), flexómetro y cinta métrica, cámara digital CANON EOS-450D, objetivos electrónicos SIGMA 10-20 mm. Además, se emplearon filtros UV, un trípode VELBON (documentación fotográfica) y el software Flir QuickReport (Versión 1.2, 2009) para el procesamiento de termogramas. Uno de los resultados más

importante fue la posibilidad de diferenciar el tipo de ladrillo (ladrillo macizo y ladrillo hueco) usado en las cúpulas, evidenciando reparaciones de la misma. Asimismo, se pudo identificar grietas en la cúpula como se aprecia en la Figura 2.7. El autor resalta la diferencia del contraste entre una grieta leve (izquierda) y una grieta importante (derecha). Finalmente, se pudo lograr el reconocimiento de las cúpulas que han sido reparadas total y parcialmente. Por ejemplo, los termogramas permitieron la detección de la estructura metálica que fue usada para la reconstrucción total de una cúpula.

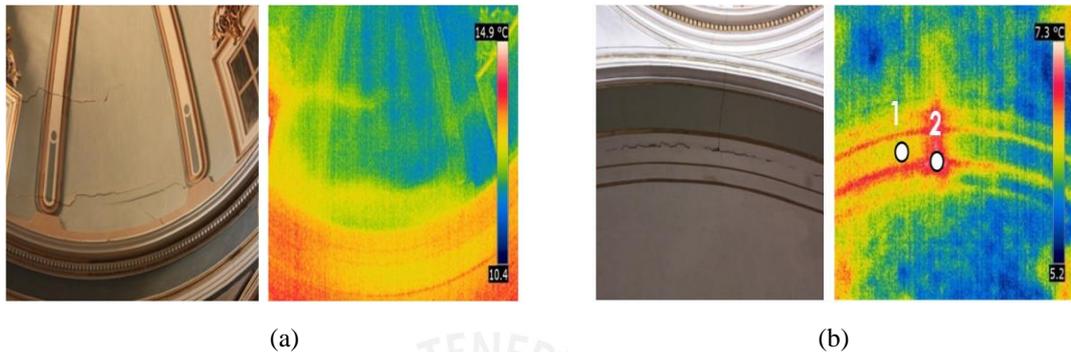


Figura 2.7- Termogramas donde se evidencia la diferencia entre una grieta de importancia leve (izquierda) con una de mayor relevancia (derecha) (Pérez-Sánchez y Piedecausa-García, B., 2016).

Otro caso de estudio interesante sobre termografía pasiva es el realizado por Bilotta (2013). Esta investigación tuvo como objetivo la ejecución de un análisis de las pérdidas energéticas de una biblioteca a través de termografía infrarroja pasiva. Bilotta (2013) pretendió promover la utilización de la termografía como un método de inspección que detecte anomalías en el menor tiempo posible para no afectar la comodidad de las personas. Las patologías en las que se enfocó su investigación fueron problemas energéticos como aislamiento térmico deficiente, problemas de humedad y fallos en los cerramientos. Estas patologías deben ser detectadas en el menor tiempo posible, ya que, esto causa incomodidad, altos costos de operación y consumo excesivo de energía (Navarro, 2014). Es importante mencionar que el número de casos de aplicación de la termografía infrarroja pasiva para el cálculo de eficiencias energéticas de edificaciones se encuentra en crecimiento. Podemos mencionar los trabajos de González (2013) o de Navarro (2014), por ejemplo. El equipo empleado por Bilotta (2013) en su investigación fue una cámara termográfica Flir T400, con la que realizó ensayos termográficos en diferentes ambientes para luego calificarlos según su desempeño energético. El autor afirma que esta clasificación según desempeño energético podría emplearse para priorizar las actividades correctivas.

2.4.2. Termografía activa

Este tipo de termografía infrarroja se caracteriza por contar con algún tipo de estímulo externo controlado por el operador (Figura 2.8). La naturaleza del estímulo externo varía con el tipo de termografía activa y se define por las características de la anomalía u objeto que se desea estudiar o caracterizar. Es importante acotar que cada tipo de termografía activa tiene ventajas y desventajas al estudiar determinadas características de un mismo defecto. Una investigación de lo anteriormente mencionado fue el realizado por Balageas (2014), donde estudió un muro de concreto con vacíos a posiciones conocidas con termografía de pulso (PT) y de pulso largo (SH), obteniendo diferentes resultados. A continuación, se listarán los tipos de termografías más importantes considerados en el presente documento.

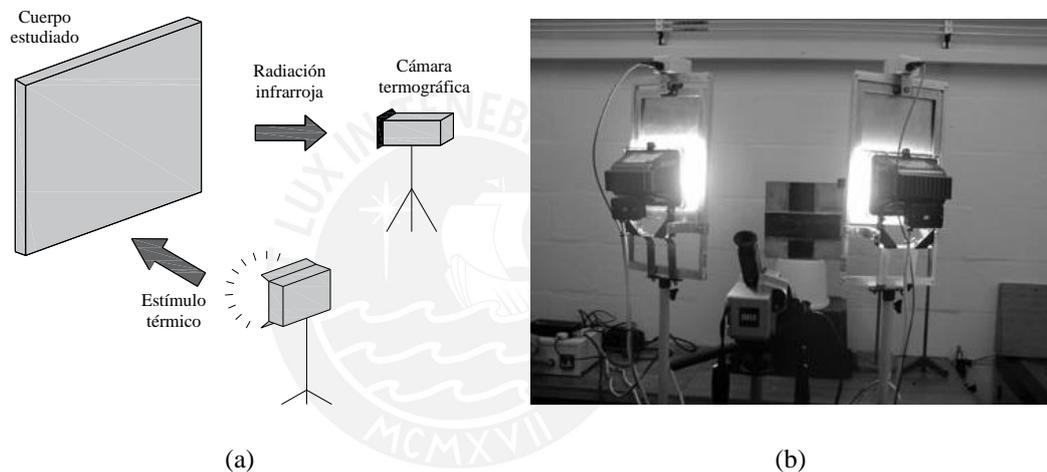


Figura 2.8- Termografía activa: (a) esquema del ensayo y (b) fotografía del ensayo (<http://international.fhwa.dot.gov/superiormaterials/chap3.cfm>).

2.4.2.1. Termografía de pulso (PT)

La termografía de pulso o “pulsed thermography” (PT) se caracteriza por la ejecución de un calentamiento mediante un impulso de calor y se observa la curva de decaimiento de temperatura del cuerpo con la cámara termográfica en la etapa de enfriamiento (Sun, 2014). En otras palabras, se emite grandes cantidades de energía en tiempos muy cortos y se observa las anomalías luego de realizado el impulso. Este método es el más usado dentro de la termografía activa, ya que, la duración del estímulo de calor dura usualmente milisegundos, lo que implica una inspección rápida del cuerpo estudiado (Maldague, 2002).

Según Maldague (2002), el fenómeno que ocurre durante un ensayo de termografía pulsada (PT) es el descrito a continuación. Primero, la temperatura del material incrementa debido al impulso de calor. Luego, la temperatura decae debido a la propagación de la energía desde la superficie a la profundidad del cuerpo por difusión. La presencia de un defecto se traduce en una disminución de la velocidad de difusión, por lo que cuando la cámara termográfica observe la temperatura superficial, se va a observar una acumulación de temperatura alrededor del defecto. Cabe acotar que los defectos más profundos aparecerán después y con un menor contraste de temperatura debido a la difusión del impulso de calor a través del cuerpo.

Un ejemplo de aplicación de termografía pulsada es el que realizó Balageas (2014). El objetivo de su investigación fue estudiar los alcances y limitaciones de la termografía de pulso (PT) y compararlos con la termografía de pulso largo (SH). Esta comparación se efectuó en dos condiciones: (1) termogramas de termografía de pulso sin tratamiento de imágenes y (2) termogramas luego de aplicar una técnica de post-procesamiento basado en una regresión polinomial logarítmica. Todo este análisis se enfocó en el estudio de una placa compuesta de carbono/epoxi, cuyas dimensiones eran de 27 cm x 20 cm y de 5.25 mm de espesor. Los vacíos se encontraban a 0.4, 1.3, 2.6 y 4 milímetros de profundidad. Balageas (2014) empleó una lámpara flash Elinchrom que emitía una energía de 6 kJ en 4 ms debido a que se requiere gran cantidad de energía en milisegundos para los ensayos PT. La cámara termográfica usada fue una Flir X6540 SC MWIR (640 x 512 pixeles) y la toma de termogramas fue realizada por un tiempo de 60 s con una velocidad de 100 imágenes por segundo.

La principal conclusión a la que se llegó sobre la termografía de pulso fue que sin tratamiento de imágenes este tipo de termografía tenía bastantes limitaciones como la no observación de los vacíos más profundos (Figura 2.9a). Sin embargo, aplicando la regresión polinomial logarítmica (TSR) a los termogramas, la visualización de los termogramas mejoró notablemente, como se puede apreciar en la Figura 2.9b.

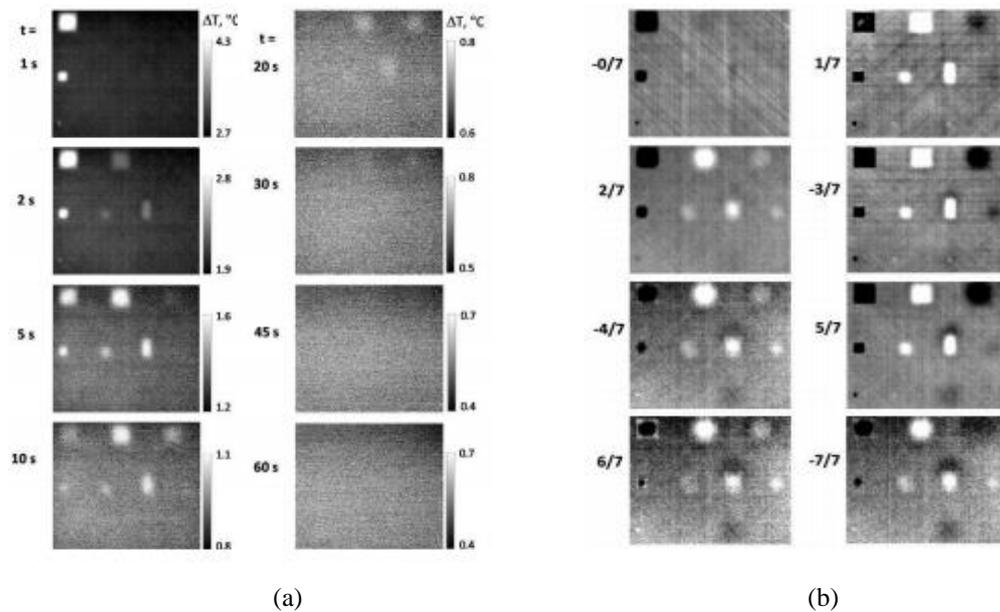


Figura 2.9-Termografía de pulso de una placa compuesta de carbón/epoxy (a) Termogramas PT sin aplicación de técnica de post-procesamiento (b) Termogramas PT con técnica TSR de post-procesamiento (Balageas ,2014).

Otro interesante caso de estudio de PT es el abordado por Sakagami y Kubo (2002). En este caso de estudio se realizó una inspección de una muestra con vacíos a profundidades conocidas y compuesto por 6 materiales: acero suave, acero inoxidable, aluminio de aleación, cobre, grafito y cerámica. El objetivo principal de este estudio fue estudiar la influencia de la conductividad térmica en los ensayos de termografía de pulso. Cabe resaltar que la conductividad térmica de la muestra era variable debido a la presencia de los distintos materiales mencionados anteriormente. El equipo usado para la generación del impulso de calor de 2 ms de duración fue una lámpara flash de xenón. El espécimen estudiado tenía unas dimensiones de 12 x12x 1 cm con vacíos de sección circular con un diámetro variable en el eje horizontal y profundidad variable en el eje vertical. Las conclusiones del trabajo de Sakagami et al. (2014) fueron obtenidas a partir del análisis de los termogramas contenidos en la Figura 2.10. El análisis termográfico permitió concluir que los materiales de alta conductividad térmica permitieron la detección de los defectos de mayor profundidad (7 mm). Asimismo, se afirma que, si se desea estudiar los defectos superficiales, los termogramas deben ser tomados luego de un muy corto tiempo de realizado el impulso de calor. Por último, se concluyó que los materiales de baja conductividad (cerámica y acero inoxidable) tuvieron como límite la visualización de defectos a 2 mm.

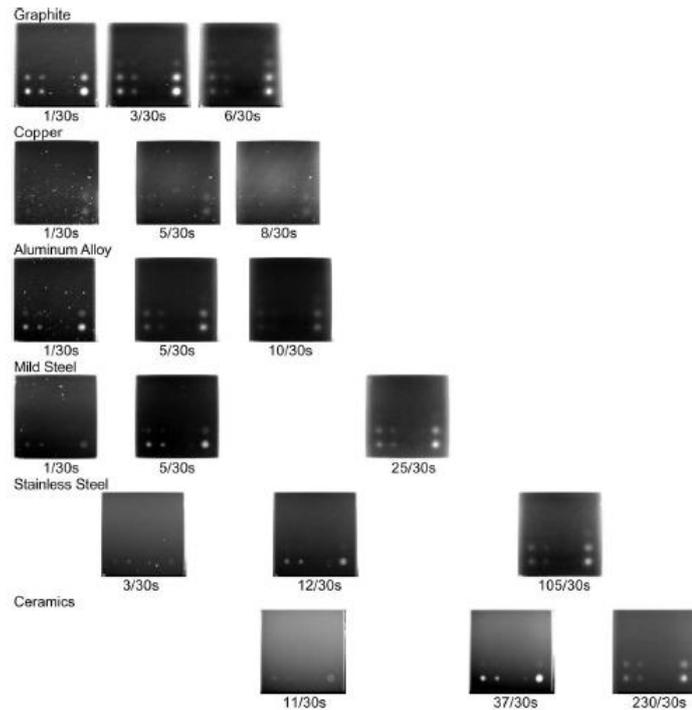


Figura 2.10- Resultados de PT de defectos en diferentes materiales (Sakagami y Kubo ,2002).

Antes de presentar el último caso de estudio PT, es conveniente señalar que, aunque el impulso de calor sea un pulso largo (calentamiento producido lámpara halógena u horno), también será considerado como PT si se observa la etapa de enfriamiento del espécimen (Kylili, 2014). Un ejemplo de esto es la investigación de Aggelis et al. (2010), donde se estudió un espécimen de concreto en 4 casos: (1) intacto, (2) fisuras producto de una deflexión de 2 mm (3) deflexión de 1.5 mm y (4) deflexión de 1mm. El equipo empleado fue una cámara Flir T360 y un horno como fuente de calor. La metodología usada fue calentar el espécimen en el horno por 3 horas a 90 °C. Luego, estudiar el enfriamiento mediante la cámara termográfica, colocada a 1.6 m del espécimen. El análisis de los termogramas permitió concluir que mediante este tipo de termografía es posible observar claramente el área dañada del espécimen debido a una deflexión de 2 mm (Figura 2.11 (a)) y 1.5 mm. Sin embargo, para la deflexión de 1 mm fue necesario elaborar una curva de la temperatura promedio vertical pues el área dañada no pudo detectarse a simple vista en el termograma (Figura 2.11 (b)). Esta curva, además, ayuda a reducir la posibilidad de un análisis erróneo producto de los defectos propios del concreto como burbujas de aire.

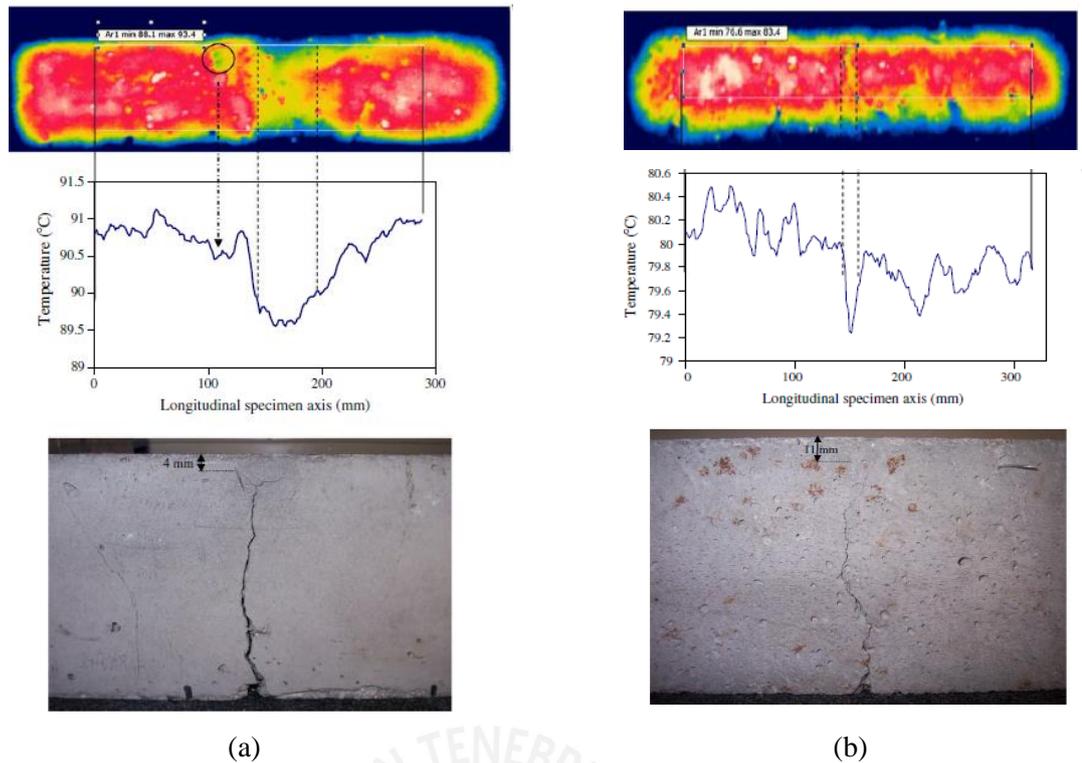


Figura 2.11- Ensayo de un espécimen de concreto fisurado (termograma, curva de temperatura promedio y fotografía): (a) deflexión 1 mm y (b) deflexión de 2mm (Aggelis et al., 2010).

2.4.2.2. Termografía Lock-In (LT)

En la termografía Lock-In o de demodulación (LT), el calentamiento producido tiene características periódicas, usualmente sinusoidales (Balageas, 2007). De igual manera, Maldague (2002) afirma que LT está basado en las ondas térmicas que se generan en el espécimen debido a que este se somete a un calentamiento sinusoidal. Este calentamiento sinusoidal puede ser efectuado por la emisión de calor al objeto de forma periódica, por ejemplo, por una lámpara junto con un amplificador Lock-In. Se afirma que el objetivo del LT es observar la onda térmica resultante, que dependerá de la estimulación periódica, mediante un adecuado aparato que permite observar la fase y amplitud de esta onda térmica de respuesta (Maldague, 2002).

A diferencia de la termografía pulsada (PT) donde, como se ha visto, el resultado es solo un termograma, en LT se obtienen dos termogramas, uno de fase referente al tiempo de propagación y otra de amplitud relacionado a la difusión térmica del material.

Según Wu y Busse (1998), un equipo indispensable para la realización de ensayos LT es el amplificador Lock-In, ya que, este proporciona información de la fase y amplitud de la onda térmica inducida, datos necesarios para el análisis cuantitativo de la

información obtenida de los termogramas. A continuación, se presenta un esquema con las principales componentes de un ensayo de termografía (LT) (Figura 2.12).

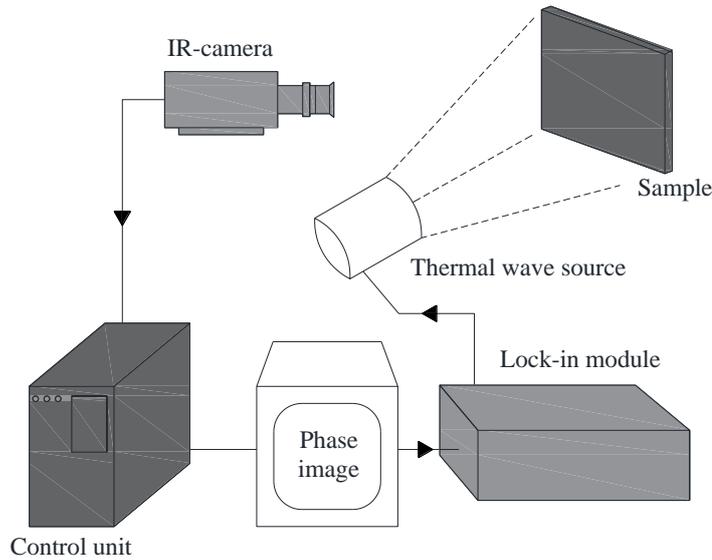


Figura 2.12- Esquema de ensayo LT. Adaptado de Wu y Busse (1998).

Un ejemplo de aplicación de termografía Lock-In es el realizado por Kordatos et al. (2013), donde usa este tipo de termografía para evaluar el daño de pinturas murales y mampostería del Monasterio de Molybdoskepastos (Grecia). Se debe agregar que se usó LT solo para evaluar el daño de una inscripción dentro de la iglesia. Para realizar dicho estudio se emplearon 4 lámparas alimentadas con corriente alterna, una unidad de control de procesamiento de imágenes y un amplificador Lock-In. La cámara termográfica usada durante los ensayos LT fue una cámara de onda media (MWIR) de la marca CEDIP cuyos sensores son detectores refrigerados. La conclusión a la que se llegó en este estudio fue que LT fue útil para diferenciar los distintos materiales de la zona donde se encontraba la inscripción como paja, alambre y grava (Figura 2.13). Sin embargo, no se pudo demostrar su utilidad para evaluar el daño en la inscripción (Kordatos et al., 2013).

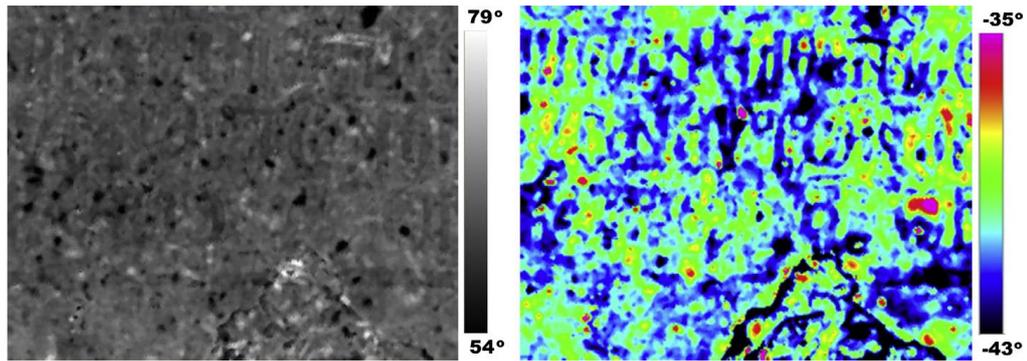


Figura 2.13- Termograma obtenido por LT de la inscripción en una iglesia (Kordatos et al., 2013).

Otro caso interesante de aplicación de Lock-In es el realizado por Sakagami (2002). El principal objetivo de su investigación fue probar que mediante la termografía Lock-In es posible estudiar defectos como desprendimiento o pérdida de material por corrosión. Estos defectos fueron simulados por orificios de fondo plano. La fuente de estimulación externa fue una lámpara de xenón. La luz de la lámpara de xenón fue cortada periódicamente por un obturador eléctrico con el fin de generar un flujo de calor modulado en el cuerpo. El obturador eléctrico fue controlado por una señal de referencia usada para el procesamiento Lock-In. El espécimen fue una plancha de acero con orificios planos a diferentes profundidades. Estos orificios tuvieron un diámetro de 1 cm y estuvieron a profundidades de 1, 2, 3 y 4 mm. El ensayo LT fue realizado con diferentes frecuencias: 1, 0.5, 0.33 y 0.2 Hz. La figura 2.14 muestra los termogramas de fase como resultado de los ensayos termográficos. Se demostró que mediante LT es factible visualizar los defectos a causa de los orificios en la plancha de acero. Asimismo, Sakagami (2002) afirma que los defectos más profundos fueron detectados cuando se aplicó un calentamiento periódico de 0.2 Hz, correspondiente a la menor frecuencia. Por lo tanto, se concluye que los defectos más profundos serán observados a menores frecuencias (Sakagami, 2002).

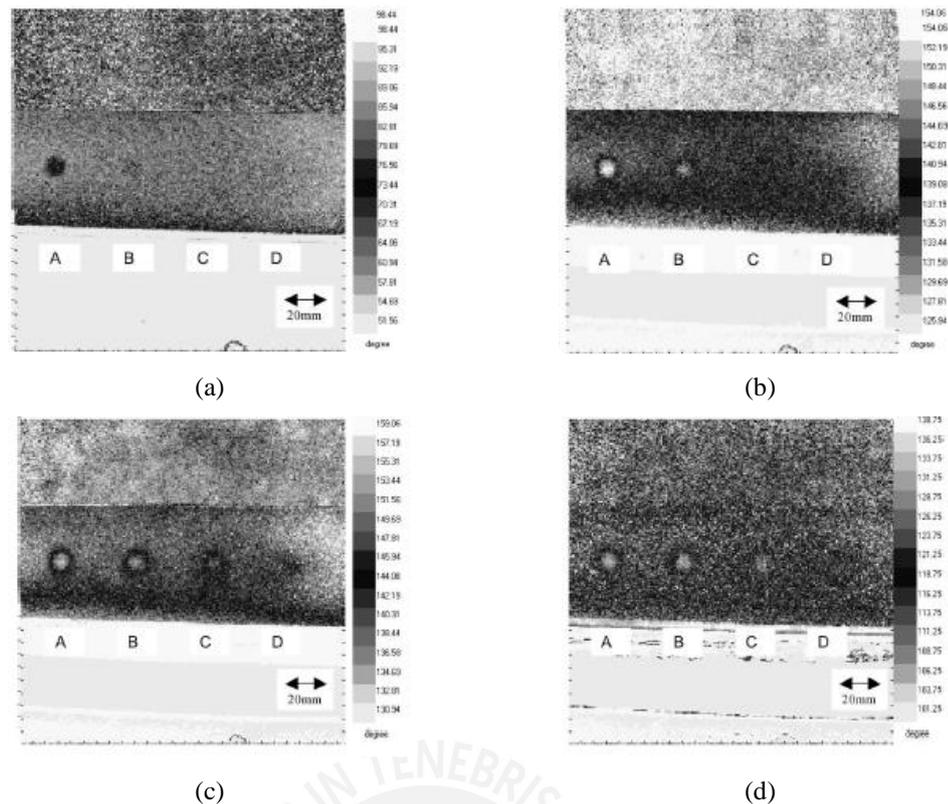


Figura 2.14- Resultados de ensayos LT: (a) termograma LT de fase con frecuencia de 1 Hz, (b) termograma LT de fase con frecuencia de 0.5 Hz, (c) termograma LT de fase con frecuencia de 0.33 Hz y (d) termograma LT de fase con frecuencia de 0.2 Hz (Sakagami, 2002).

Finalmente, otro caso de estudio de termografía LT fue el realizado por Meola, Di Maio, Roberti y Carlomagno (2005). Estos investigadores estudiaron con LT un espécimen de mampostería de dimensiones de 900 x 900 mm. El espécimen presentaba defectos representados por disquetes de corcho y bolsas de plástico llenas de aire que fueron colocados entre el soporte y el yeso. Estos defectos simulaban los desprendimientos del yeso. Los disquetes de corcho y las bolsas de plástico poseían tres diámetros diferentes ($d = 40, 60$ y 100 mm). El espesor fue de aproximadamente 1 mm para los disquetes de corcho y 2 mm para bolsas de plástico. El equipo empleado durante esta investigación fue un sistema termográfico AGEMA Thermovision 900 LW. Este sistema está acoplado a una fuente de onda térmica, que opera de tal manera que resulta una modulación sinusoidal de la temperatura. La modulación es generada por una señal eléctrica no lineal producida por el módulo Lock-In. Los resultados de los ensayos termográficos demostraron que con la termografía Lock-In se pudo observar que la bolsa de plástico de la muestra había sido mal ubicada. Luego, se removió la bolsa de plástico con una parte de yeso, se la sustituyó y se cubrió con lechada. El color más oscuro en la Figura 2.15 (a) indica una posición oblicua de la bolsa de plástico. En la Figura 2.15 (b), es posible ver un disco central que está rodeado

por otro de mayor tamaño, este último sería el contorno del yeso restaurado (Meola et al., 2005). Por lo tanto, se demostró la capacidad de LT para detectar la bolsa de plástico debajo del yeso y de diferenciar las capas de yeso fabricadas en diferentes momentos. Por consiguiente, se puede afirmar que LT es capaz de proporcionar información detallada sobre el tamaño, la posición y la naturaleza de los defectos y de discriminar entre estructuras en capas y variaciones locales de la consistencia del hormigón (Meola et al., 2005). Desafortunadamente, LT se limita a capas de concreto delgadas (Meola et al., 2005).

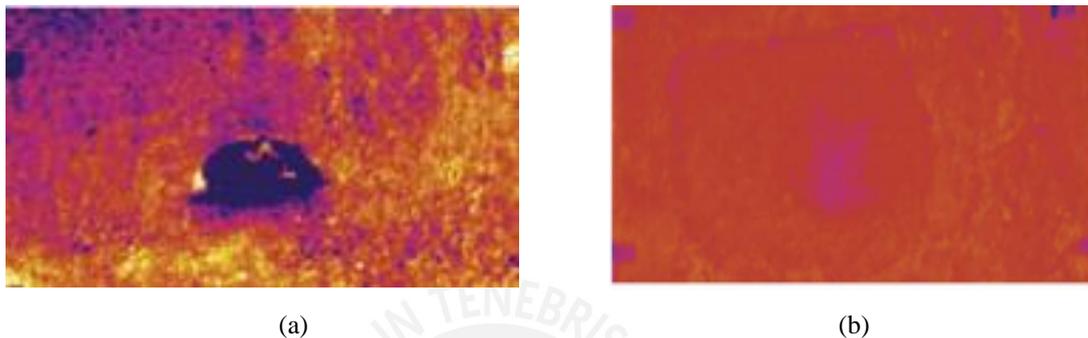


Figura 2.15- (a) Termogramas de fase de dicha zona antes de la restauración ($f = 0,015$ Hz) y (b) termogramas de fase después de restauración ($f = 0,0037$ Hz) (Meola et al., 2005).

2.4.2.3. Termografía de fase pulsada (PPT)

La termografía de fase pulsada o PPT, combina los métodos de la termografía Lock-In (LT) y la termografía pulsada (PT), y se caracteriza porque “utiliza un impulso de calentamiento al igual que en PT y se descodifica la mezcla de frecuencias de las ondas térmicas lanzadas usando la transformada de Fourier como en LT” (Maldague, 2002).

Un ejemplo de aplicación de este tipo de termografía es el realizado por Kordatos (2014) donde usó este tipo de termografía para evaluar los defectos sub-superficiales de la inscripción en un muro de una iglesia griega. Para el ensayo de la termografía de fase pulsada (PPT) se emplearon 4 lámparas alimentadas con corriente alterna, una unidad de control de procesamiento de imágenes y un amplificador Lock-In. Asimismo, se usó una cámara termográfica de onda media (MWIR) de la marca CEDIP, cuyos sensores son detectores refrigerados. El termograma obtenido mediante PPT (Figura 2.16) muestra los defectos sub-superficiales, representados por un color magenta, que no son apreciables en la fotografía digital. El grupo de investigación observó un mural preexistente a los estudiados para poder averiguar qué podían representar estas manchas magentas. En estos murales de mayor antigüedad se observó

la presencia de agujeros debido a que los hagiógrafos realizaban esto para que los nuevos murales se sujeten mejor. Por lo tanto, se concluyó que los defectos magenta observables eran los orificios anteriormente descritos y no presentan la misma forma debido a que estos están parcialmente llenos por pintura. Por consiguiente, se comprobó que PPT tiene gran potencial de detectar defectos a profundidad.

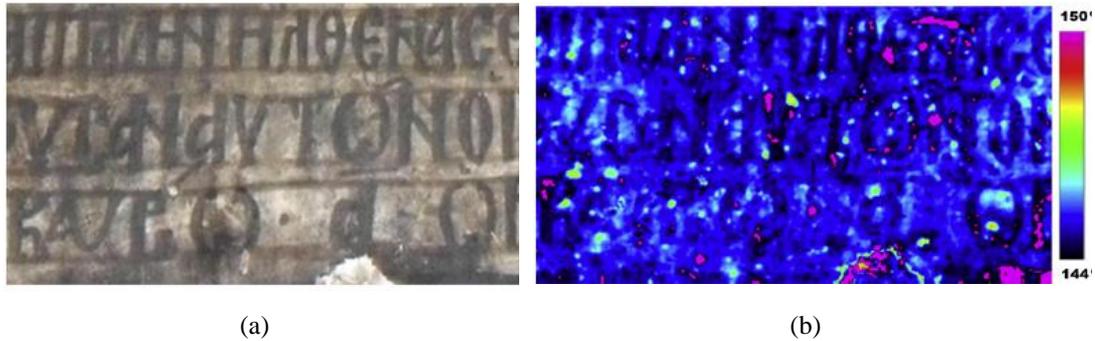


Figura 2.16- Ensayos LT en inscripción de una iglesia: (a) fotografía digital de parte de la inscripción y (b) termograma PPT con defectos sub-superficiales (Kordatos et al., 2013).

2.4.2.4. Termografía de pulso largo (SH)

Finalmente, la termografía de pulso largo o SH se caracteriza por un calentamiento constante y a baja potencia, donde se observa el comportamiento térmico del objeto de estudio durante la etapa de calentamiento (Maldague, 2002).

Un caso de aplicación de termografía SH fue el realizado por Balageas y Roche (2014). El objetivo de esta investigación fue comprobar el uso de la técnica de post-procesamiento de datos TSR como herramienta que mejora la visualización de los defectos de la termografía PT y la SH. Ellos usaron dos lámparas halógenas de 600 W. El calentamiento se efectuó durante los 60 segundos que duró el ensayo. Los resultados del uso de la termografía Step Heating (SH) en esta investigación son mostrados en la Figura 2.17. Como se mencionó anteriormente, los resultados de PT fueron mejorados notablemente con TSR (Figura 2.9). Por otro lado, los termogramas obtenidos con termografía SH también son mejorados con TSR (Figura 2.17 (b)); sin embargo, no en la misma escala que en PT. Por lo tanto, se concluye que, sin la aplicación de alguna técnica de procesamiento, la termografía SH permite una mejor visualización de defectos que en PT; sin embargo, cuando se aplica la técnica de procesamiento de imágenes TSR, los resultados de PT son notablemente mejores que los obtenidos mediante SH.

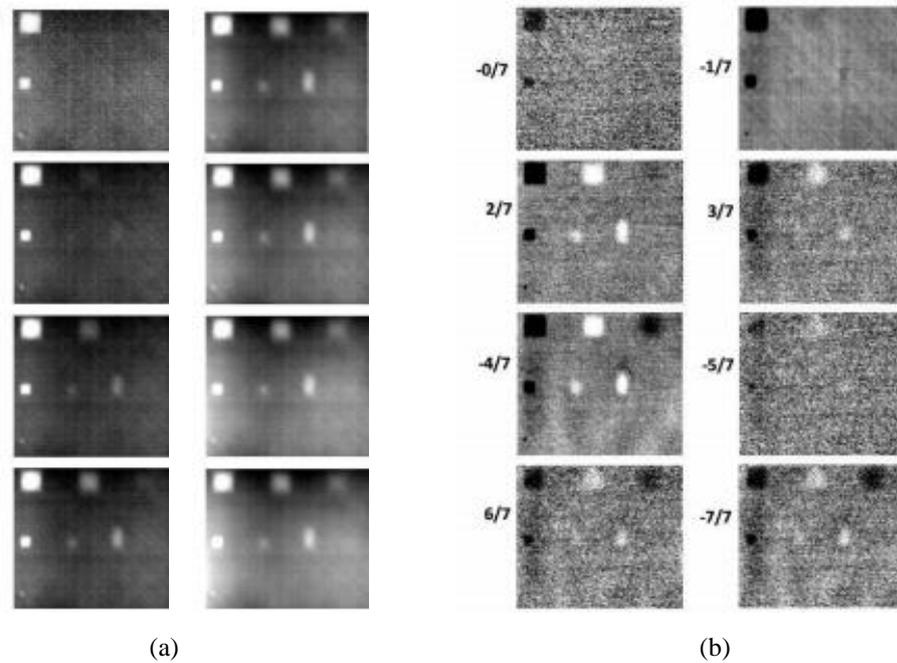


Figura 2.17- Ensayos SH a plancha de acero: (a) termogramas SH sin aplicación de técnica de post-procesamiento y (b) Termogramas SH con técnica TSR de post-procesamiento (Balageas, 2014).

2.5. Post-procesamiento de datos

La etapa final de un ensayo termográfico corresponde al post-procesamiento de datos. Luego de realizado la toma de termogramas del cuerpo u objeto estudiado es necesario realizar el análisis termográfico o aplicar técnicas de procesamiento de datos. En esta parte del presente trabajo de investigación se listarán los diferentes tratamientos y análisis tanto cualitativos como cuantitativos que se realizan con los termogramas.

2.5.1. Análisis cualitativo

2.5.1.1. Mapas térmicos 3-D

Los mapas térmicos en tres dimensiones (3D) son una herramienta de procesamiento de datos que mejora la presentación de los termogramas. Esta herramienta necesita como datos de entrada la información de temperatura contenida en los termogramas obtenidos a través del uso de la cámara termográfica. Con la data extraída se elabora un gráfico en tres dimensiones, donde el eje “x” e “y” representan un píxel del termograma, mientras que el eje “z”, indica la temperatura de cada píxel (Kordatos et al., 2013). Para la extracción de los datos de los termogramas es necesario el uso de softwares tales como Flir Tools o Flir ResearchIR de Flir Systems (softwares comerciales). Sin embargo, también se han desarrollado programas como el creado por Krenzinger y Vera (2006) llamado PROIR. Este software de post-procesamiento de

datos fue desarrollado con el fin de contar con un programa más funcional que los softwares que vienen incluidos con las cámaras termográficas (usualmente simples) y menos costosos que los softwares comerciales especializados. PRIOR fue desarrollado en lenguaje Visual Basic (VB) y su función principal es extraer la información de la imagen térmica teniendo como parámetro de entrada un termograma y la escala de grises correspondiente. El parámetro de salida de PRIOR es la distribución de temperatura del objeto en una matriz numérica, almacenado en un archivo de texto en formato de una línea para cada píxel (Kreuzinger et al., 2006). Además, se afirma que este formato es reconocido por softwares de diseño de gráficos en tres dimensiones, lo que implica compatibilidad con otros programas. A continuación, se presenta un ejemplo de un mapa térmico obtenido a través de un programa comercial de gráficos, que tuvo como parámetro de entrada la matriz de temperatura generada por PRIOR de un termograma de un módulo fotovoltaico.

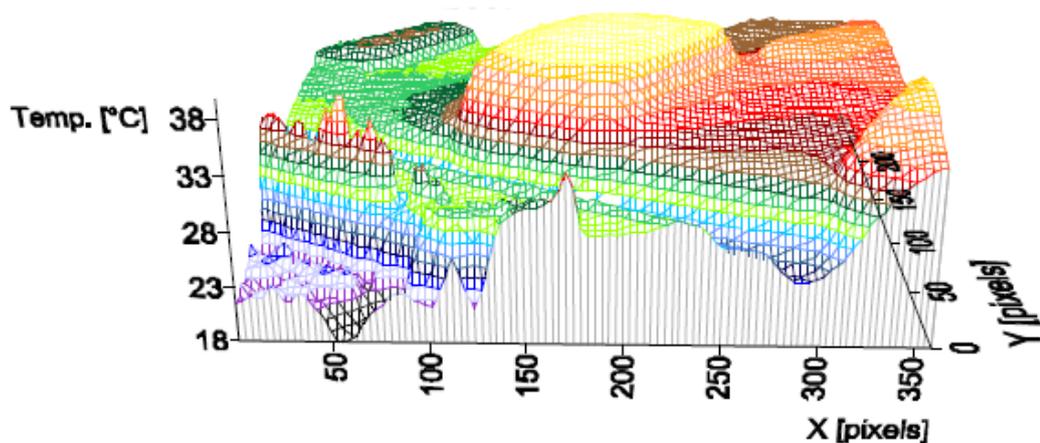


Figura 2.18- Mapa térmico 3D (Kreuzinger & Vera, 2006).

Un ejemplo de aplicación en el campo de los mapas térmicos fue el realizado por Kordatos et al. (2013). Los mapas térmicos 3D fueron empleados dentro de la evaluación e inspección de murales de un Monasterio en Grecia. El objetivo de la elaboración de los mapas térmicos fue el de resaltar las partes dañadas de los murales representadas por una mayor variación de temperatura. Como se aprecia en la Figura 2.19, los mapas térmicos 3D permitieron un mejor reconocimiento para una posterior restauración de las partes más afectadas a causa de desprendimientos.

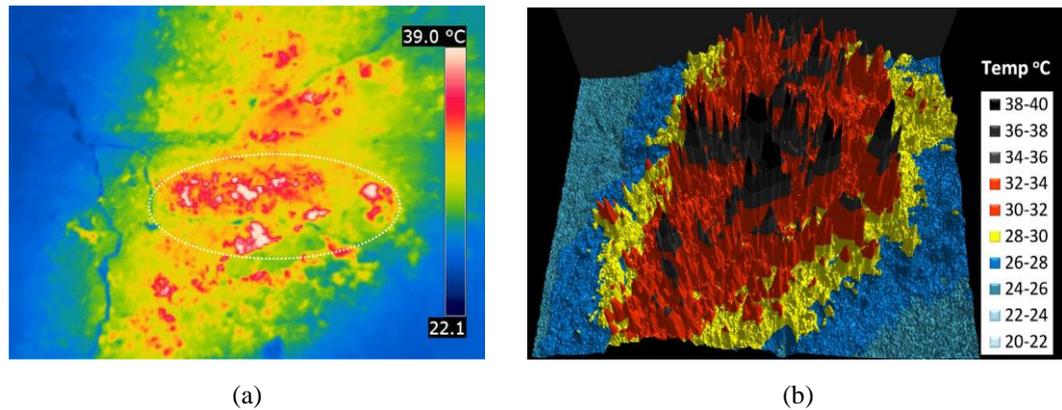


Figura 2.19- Uso de mapas térmicos 3D: (a) Termograma de mural en el techo y (b) mapa térmico 3-D de termograma (Kordatos et al., 2013).

2.5.1.2. Técnicas de procesamiento de imágenes termográficas – Termographic signal reconstruction (TSR)

Esta técnica de procesamiento de imágenes es ampliamente usada como herramienta de post-procesamiento de datos en ensayos termográficos [(Shepard et al., 2002), (Roche & Balageas, 2014) y (Genest et al., 2009)]. Esta herramienta está basada en una regresión polinomial logarítmica (Roche & Balageas, 2014).

Roche & Balageas (2014) aplicaron TSR en el procesamiento de termogramas provenientes de ensayos PT (pulsed thermography) y SH (Step-Heating) para estudiar la eficiencia de esta técnica. El objetivo de su trabajo de investigación fue demostrar la aplicabilidad del TSR como herramienta de procesamiento en los dos tipos de termografía mencionados anteriormente. Como se ha visto en la sección correspondiente a Step-Heating, este tipo de termografía permitió observar defectos de mayor profundidad que la termografía PT sin la aplicación de herramientas de post-procesamiento de datos. Sin embargo, todo lo contrario se observó cuando se aplicó la técnica de post-procesamiento conocida como TSR. Para esta investigación, el TSR fue desarrollado con polinomios logarítmicos de grado 7. Gracias a esta técnica se demostró que con PT se logra un mejor contraste y, por consiguiente, una mejora en la visualización de los defectos que con Step-Heating, llegando a mayor profundidad. La aplicación de TSR también demostró ser compatible con la termografía Step-Heating aunque no fue tan efectivo como en PT. A continuación, se muestra las 8 imágenes asociadas con el polinomio logarítmico de grado 7 usado para la regresión TSR en los dos tipos de termografía, PT y Step Heating (Figura 2.20).

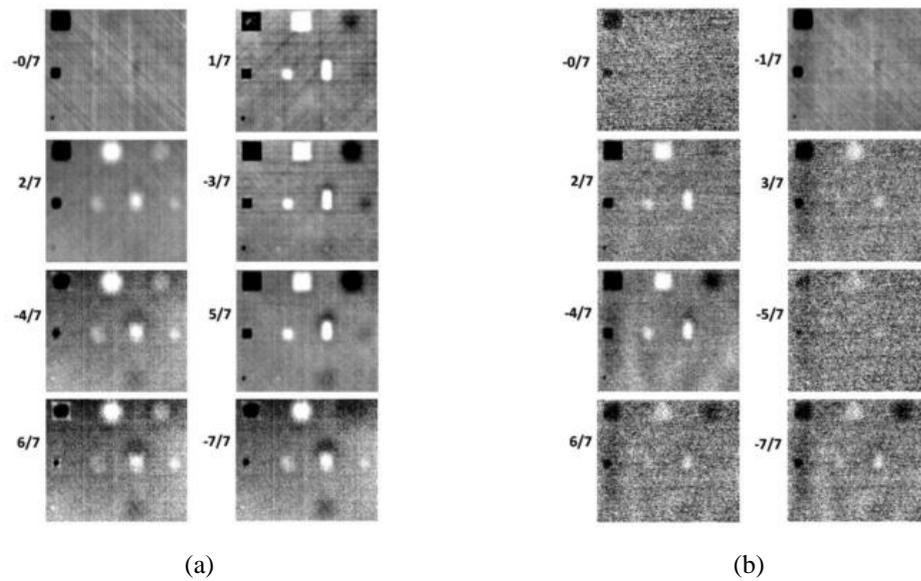


Figura 2.20- Imágenes asociadas al polinomio logarítmico de grado 7 usado para la regresión TSR: (a) Pulsed Thermography (b) Step-Heating (Roche & Balageas, 2014).

Otro caso de estudio de la aplicación de TSR fue el realizado por Genest et al.(2009). El propósito de su investigación fue detectar desuniones y monitorear el crecimiento de desuniones de reparaciones en aeronaves. Según Genest et al.(2009), TSR es una técnica que ayuda a reducir la influencia de las variaciones observadas en análisis tradicional del dominio en el tiempo y contraste basados en PT. Además, se afirma que la calidad de los resultados es afectada por la variación de las propiedades térmicas inherente a la adhesividad de la unión reparada. Los termogramas adquiridos mediante PT se procesaron mediante este método para investigar la eficacia de TSR. El resultado de la aplicación de la técnica TSR fue una mejora notable en la visualización respecto a los termogramas sin procesar.

2.5.2. Análisis cuantitativo mediante curvas transitorias

Una herramienta usada frecuentemente cuando se ejecuta un análisis cuantitativo en termografía activa son las curvas transitorias (Avdelidis & Almond, 2004; Maierhofer, Brink, Röllig, & Wiggenhauser, 2003; Maierhofer, Wiggenhauser, Brink, & Röllig, 2004). Según Maierhofer, Brink, Röllig, & Wiggenhauser (2002), las curvas transitorias o transient curves son diagramas que pueden dar información de los defectos como su profundidad, tamaño lateral y tipo de material.

Un gráfico que ayuda en la explicación del concepto de una curva transitoria se muestra en la Figura 2.21. Una curva transitoria es un gráfico que resulta de la diferencia de temperatura entre un punto correspondiente a un defecto y un punto de

referencia del material homogéneo no defectuoso. Este análisis se realiza en el tiempo, por lo que se observa la variación de temperatura cuando se ha desconectado la fuente de calor, en otras palabras, en la etapa de enfriamiento. Los datos más importantes de este análisis temporal son la máxima diferencia de temperatura ($\Delta T_{\text{máx}}$) entre un punto correspondiente a un defecto y el punto de referencia en el material homogéneo y el tiempo en el que ocurre $\Delta T_{\text{máx}}$, denotado por $t_{\text{máx}}$.

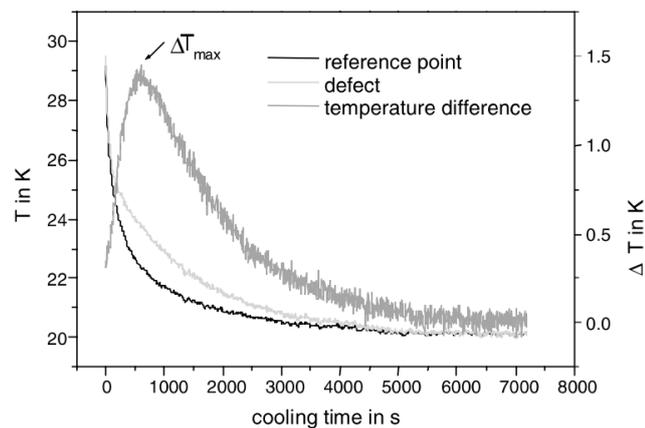


Figura 2.21- Curvas transitorias - Transient Curves (Maierhofer, Brink, Röllig, & Wiggenhauser, 2005).

El estudio de las curvas transitorias y sus dos parámetros principales fue ejecutado por Maierhofer et al. (2005). En su investigación se demostró que $\Delta T_{\text{máx}}$ y $t_{\text{máx}}$ dependen de la duración del calentamiento y la profundidad de los defectos observados. Se confirmó que $\Delta T_{\text{máx}}$ se incrementa cuando la duración del calentamiento aumenta, y cuando la profundidad del defecto es mayor, $\Delta T_{\text{máx}}$ disminuye. Por otro lado, $t_{\text{máx}}$ disminuye cuando la duración del calentamiento aumenta y se incrementa cuando la profundidad del defecto es mayor. Estas curvas transitorias se pueden obtener mediante ensayos experimentales de termografía activa o a través de una simulación numérica (Maierhofer et al., 2002).

Un ejemplo de aplicación de las curvas transitorias en ensayos de laboratorio fue el realizado por Maierhofer et al. (2002). En esta investigación se realizó una predicción de las profundidades de los defectos simulados por bloques de poliestireno de un bloque de concreto mediante la calibración de resultados producto de un modelamiento en un software y datos experimentales. El primer objetivo de la investigación fue obtener curvas de calibración. Estas curvas dependen del $t_{\text{máx}}$ en segundos y la profundidad del defecto en centímetros y poseen una duración de calentamiento característico. Por consiguiente, para obtener estas curvas de calibración se debió calcular las curvas transitorias para cada duración de calentamiento. Esto se realizó

mediante el modelamiento de la muestra de concreto con defectos en un software basado en diferencias finitas y la ecuación diferencial de Fourier. Según Fourier, la temperatura de cada uno de los nodos para el siguiente diferencial de tiempo está dada por la siguiente ecuación diferencial.

$$T_{x,y,z,t+1} = T_{x,y,z,t} - \frac{\lambda \Delta t}{\rho c_p} \left(\frac{2T_{x,y,z,t} - T_{x+1,y,z,t} - T_{x-1,y,z,t}}{\Delta x^2} + \frac{2T_{x,y,z,t} - T_{x,y+1,z,t} - T_{x,y-1,z,t}}{\Delta y^2} + \frac{2T_{x,y,z,t} - T_{x,y,z+1,t} - T_{x,y,z-1,t}}{\Delta z^2} \right)$$

Figura 2.22- Ecuación diferencial de Fourier.

En esta ecuación " λ " es la conductividad térmica, " ρ " es la densidad, " c_p " es la capacidad específica calorífica y " Δt " es el tamaño del diferencial de tiempo. Luego, para la simulación del bloque (concreto) y sus defectos (bloques de poliestireno) se debieron introducir los parámetros de entrada mostrados en la tabla 2.2. Con el uso del software se simuló un estímulo de calor en una cara superficial del bloque. El resultado del cálculo mediante el programa fue una matriz de la temperatura superficial del elemento para las diferentes duraciones de calentamiento y enfriamiento. En esta investigación se contó con duraciones de calentamiento de 300, 900 y 2700 s.

Tabla 2.2- Parámetros de entrada para el software de simulación (Maierhofer et al., 2005).

Parámetros	Datos
Material	Concreto
Defecto	Polystyrol hard FOAM
Dirección x-,y- and z-	0,5, 0,5 , 0,25 cm
Tamaño del espécimen	50 x 50 x 20 cm ³
Tamaño del defecto	10 x 10 x 10 cm ³
Profundidad de defectos	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10 cm
Diferencial de tiempo	1s
Tipo de observación incluyendo el calentamiento	3900, 4500, 5400 s
Duración del calentamiento	300, 900, 2700 s
Temperatura de inicio	19.7, 19.3, 20.0 °C
Calor específico	1250 W/(m ² K)

Con la matriz de la temperatura superficial de una cara del bloque se procedió a realizar las curvas transitorias para cada tiempo de calentamiento simulado. Se elaboraron curvas transitorias para cada tiempo de calentamiento (300, 900, 2700 s) por cada defecto (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 cm). A continuación, se muestran las curvas transitorias para un calentamiento de 10 y 15 minutos.

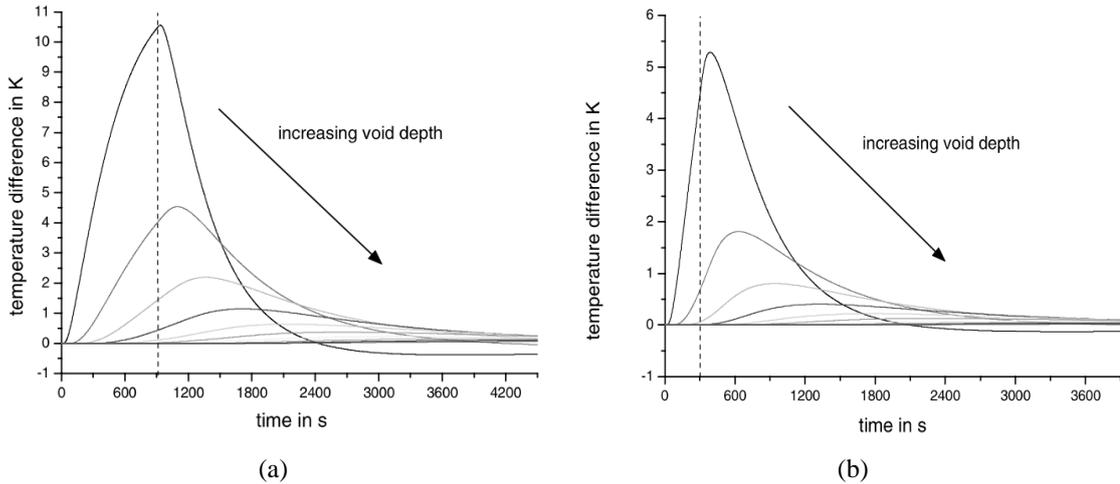


Figura 2.23- Curvas de diferencia de temperatura vs tiempo de observación (incluido el calentamiento) para cada defecto. (a) calentamiento de 10 min y (b) calentamiento de 15 min (Maierhofer et al., 2005).

Luego de obtenidas las curvas mostradas en la Figura 2.23, se procedió a extraer los dos datos más importantes de estas curvas con el objetivo de graficar la curva de calibración (producto final del modelado). Como se mencionó en líneas anteriores, estos dos parámetros son la máxima diferencia de temperatura ($\Delta T_{m\acute{a}x}$) y el tiempo en la que esta se alcanza ($t_{m\acute{a}x}$). Estos datos se plasmaron en la curva que se muestra en la Figura 2.24. Se puede observar que se graficó curvas para cada tiempo de calentamiento (5 min, 15 min y 45 min). En cada una de estas curvas se procedió a graficar la profundidad y su correspondiente $t_{m\acute{a}x}$, datos extraídos de las curvas transitorias. Además, es importante resaltar que el $t_{m\acute{a}x}$ se consideró a partir de la etapa de enfriamiento, es decir, cuando el radiador se había desconectado.

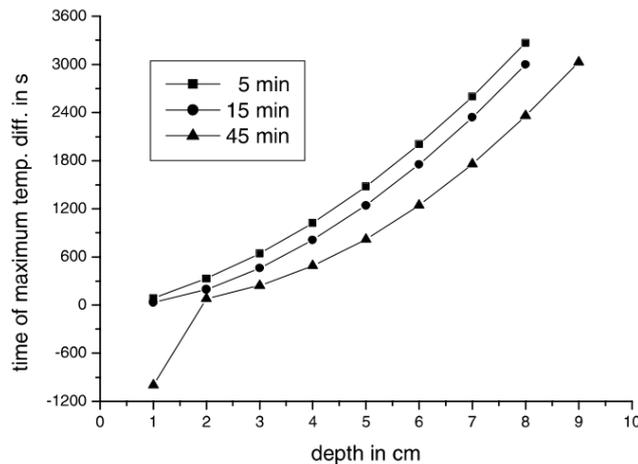


Figura 2.24- Curva de calibración (Profundidad vs $t_{m\acute{a}x}$) (Maierhofer et al., 2005).

La segunda parte del trabajo de investigación consistió en un ensayo experimental de termografía activa de la muestra de bloque de concreto con vacíos simulados con bloques de poliestireno. El análisis cuantitativo consistió en el mismo procedimiento

realizado con los resultados del modelamiento en diferencias finitas. Se graficó las curvas transitorias para las diferentes duraciones de calentamiento. Sin embargo, a diferencia de la simulación donde se analizaron los 8 defectos, en el análisis cuantitativo de los datos experimentales sólo se procesaron los datos de los 4 defectos más grandes. Se realizaron ensayos de termografía activa con los siguientes tiempos de duración: 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 25 min, 30 min, 35 min, 40 min, 45 min y 50 min. Luego de realizado el ensayo de termografía activa, se procesó la información contenida en los termogramas, teniendo como resultado las curvas transitorias para cada ensayo con una determinada duración del calentamiento. De estas curvas se obtuvo la máxima diferencia de temperatura ($\Delta T_{\text{máx}}$) y el $t_{\text{máx}}$ que fueron graficadas en función del tiempo de calentamiento para cada uno de los 4 defectos considerados (Figura 2.25).

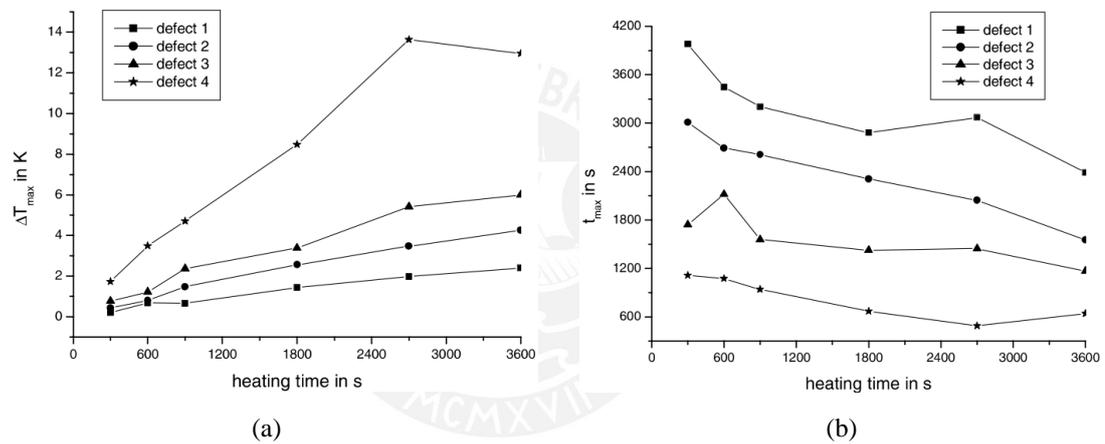


Figura 2.25- (a) Curva de tiempo de calentamiento vs máxima diferencia de temperatura y (b) curva de tiempo de calentamiento vs $t_{\text{máx}}$ (Maierhofer et al., 2005).

Finalmente, se extrajeron los datos del tiempo en el que se alcanzó la máxima diferencia de temperatura ($t_{\text{máx}}$) de la Figura 2.25-b, para tiempos de calentamiento de 5, 15 y 45 min y para los defectos 1, 2, 3,4. Los $t_{\text{máx}}$ del eje “Y” de la gráfica de la Figura 2.24 se intersectaron con los distintos tiempos de calentamiento y, para cada uno, se extrajo una profundidad del defecto en cm. Esto se realizó para los 4 defectos en las tres duraciones de calentamiento como se puede apreciar en la tabla 2.3.

La parte final de la investigación fue comparar las profundidades obtenidas por la simulación y las profundidades nominales de los defectos en el bloque de concreto. Como se puede observar en la tabla 2.3, las profundidades resultantes de la simulación se acercan bastante a las profundidades nominales de los bloques de poliestireno del espécimen. La diferencia se podría deber a una desviación propia entre el

procedimiento realizado y la teoría. Sin embargo, según Maierhofer et al. (2005), también es posible que se deba a errores constructivos, ya que, fue difícil mantener los bloques de poliestireno en su posición durante el vaciado de concreto.

Tabla 2.3- Determinación de la profundidad de defectos por comparación de los $t_{máx}$ experimentales con la curva de calibración (Maierhofer et al., 2005).

Tiempo de calentamiento en s	$t_{máx,exp}$ en s	Profundidad de defectos de las simulaciones en cm	Promedio de la profundidad de defectos de las simulaciones en cm	Profundidad nominal en cm
Defecto 1				
300	3980	-		
4900	3205	-	9	8
2700	3070	9		
Defecto 2				
300	3010	7.6		
900	2610	7.4	7.5 ± 0.1	6
2700	2045	7.5		
Defecto 3				
300	1745	5.5		
900	1560	5.6	5.8 ± 0.6	4
2700	1445	6.4		
Defecto 4				
300	1115	4.2		
900	940	4.3	4.2 ± 0.2	2
2700	490	4		

2.5.3. Integración de fotogrametría con termografía infrarroja

La integración de métodos de construcción de modelos 3D como la fotogrametría o escáner láser con la termografía infrarroja es una herramienta importante para documentar el diagnóstico del estado de conservación de edificaciones patrimoniales (Costanzo, Minasi, Casula, Musacchio, & Buongiorno, 2014). Aunque esta integración aún no está muy explorada (Lerma, Mileto, Vegas, & Cabrelles, 2007), existen casos de estudio que demuestran su aplicabilidad y ventajas, particularmente en la visualización de las anomalías y documentación del estado del patrimonio arquitectónico. Algunos resultados de este tipo de estudios se muestran en la Figura 2.26. En primer lugar, se tiene la propuesta de una metodología del uso combinado de escáner laser con termografía infrarroja (Costanzo et al., 2014) (Figura 2.26 (a)). En esta investigación se elaboró un modelo 3D del complejo Monumental San Agustín a través del uso del escáner láser. Se detectaron anomalías mediante el análisis visual del modelo 3D y se realizó un análisis termográfico de estos defectos para obtener mayor información. Por otro lado, en la Figura 2.26 (b) se muestra un modelo 3D con la textura de un termograma. Esta figura es el resultado de la aplicación de una

metodología sobre la integración de fotogrametría, escáner láser y termografía infrarroja realizado en uno de los bloques Djinn (Cabrelles et al., 2009). Por último, la Figura 2.26 (c) representa la integración de termografía infrarroja con un modelo 3D obtenido a través de fotogrametría de un estudio realizado a la iglesia de San Vito alla Rivera (Italia). A diferencia de los casos anteriores, la aplicación de texturas se realizó usando Matlab, “software que es capaz de procesar información adquirida de diferentes sensores (cámaras térmicas o cámaras fotográficas)” (Bortolin, Cadelano, Ferrarini, Furlan, & Grinzato, 2012).

La integración de la termografía con la fotogrametría responde a la necesidad de diagnósticos estructurales de construcciones grandes, donde el análisis de cada termograma por separado resulta insuficiente. Se afirma esto, ya que la mayoría de sensores de las cámaras termográficas en el mercado solo son capaces de capturar imágenes térmicas de pequeños rectángulos del total de un muro o fachada, es decir, solo es posible realizar un estudio focalizado. Sin embargo, este problema se reduce si se construye un modelo 3D de la edificación en estudio texturizado con los termogramas, como en los casos de estudios anteriores (Costanzo et al., 2014). Este procedimiento de dar textura en el rango infrarrojo al modelo 3D tiene la ventaja de proveer información espacial de la anomalía observada en algún termograma y discernir si dicha anomalía corresponde a una irregularidad geométrica (Costanzo et al., 2014).

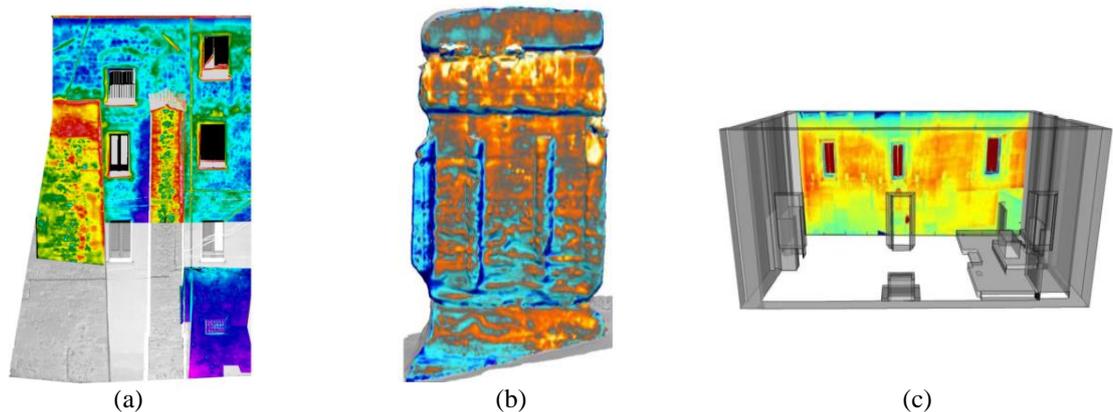


Figura 2.26- Integración de fotogrametría y escáner láser con termografía infrarroja: (a) Complejo Monumental San Agustín (Costanzo et al., 2014), (b) Bloque Djinn de Preta (Cabrelles et al., 2009) y (c) Iglesia de San Vito alla Rivera (Bortolin et al., 2012).

Capítulo 3: Aplicación de termografía infrarroja pasiva y activa para la identificación de inserciones estructurales en ensayos de laboratorio

Resumen. La detección de inserciones a profundidad y anomalías estructurales ha sido uno de los retos más abordados por estudios sobre termografía infrarroja como lo ha demostrado la revisión literaria expuesta en el capítulo anterior. El presente capítulo tiene como objetivo estudiar las ventajas y limitaciones de la termografía infrarroja tanto pasiva y activa en la identificación de inserciones estructurales y anomalías superficiales mediante ensayos de laboratorio. La campaña experimental termográfica en esta tesis involucró dos casos de estudio: (1) bloques de concreto con objetos incluidos y (2) muro compuesto de varios materiales con objetos incluidos. Los resultados de los ensayos termográficos indican que la termografía pasiva y termografía activa de pulso largo (SH) realizada con una fuente de calor compuesta por 2 lámparas halógenas de 1000 W no son capaces de detectar defectos con una profundidad mayor a 9 cm en especímenes de concreto, ni mayor a 20 cm en muros de adobe y ladrillo. Sin embargo, los ensayos en el muro de varios materiales muestran que la termografía activa de pulso largo (SH) tiene el potencial de detectar cambios de material y mejorar la visualización de defectos superficiales.

3.1. Introducción

Varios autores han realizado investigaciones enfocadas al uso de termografía infrarroja para la detección anomalías en la región superficial y sub-superficial (Meola et al. (2005), Maierhofer et al. (2002), Kordatos (2014)). Maierhofer et al. (2003) afirma que la termografía activa ha demostrado tener un gran potencial para la localización de anomalías frecuentes en edificaciones: (1) humedad en la región superficial en concreto y mampostería, (2) vacíos y zonas no uniformes en concreto y (3) juntas sin rellenar en mampostería. Dado que la termografía infrarroja es un ensayo no destructivo e incluso no necesita contacto con la superficie en estudio, lograr la detección de anomalías a profundidad mediante este método sería de gran ayuda para profesionales involucrados en el campo del diagnóstico estructural. Por lo tanto, este capítulo se enfoca en analizar las ventajas y limitaciones de la termografía pasiva y activa en la detección de anomalías superficiales y sub-superficiales mediante 2 casos de estudio: (1) bloques de concreto con objetos incluidos y (2) muro compuesto por varios materiales con objetos incluidos.

3.2. Casos de estudio en laboratorio

3.2.1. Bloques de concreto con objetos incluidos

Se estudiaron dos tipos de bloques de concreto (ver Figura 3.1). El bloque tipo I es un bloque de concreto de 50 x 50 x 25 cm que posee los siguientes materiales incluidos: (1) barra de acero 1” a 11.2 cm. de profundidad, (2) tubo de PVC 3” a 8.7 cm. y tubo de PVC 2” a 10 cm. de profundidad. Por otro lado, el bloque tipo II es un bloque de concreto de las mismas dimensiones que el bloque tipo I; sin embargo, posee otros objetos incluidos: (1) prisma de madera a 8.8 cm., (2) dos cubos de poliestireno a 10 cm. y (3) prisma de poliestireno a 10 cm de profundidad.

El objetivo de estudiar estos bloques fue investigar la capacidad de la termografía infrarroja activa de detectar defectos a profundidad, simulados por los objetos incluidos de diferentes materiales.

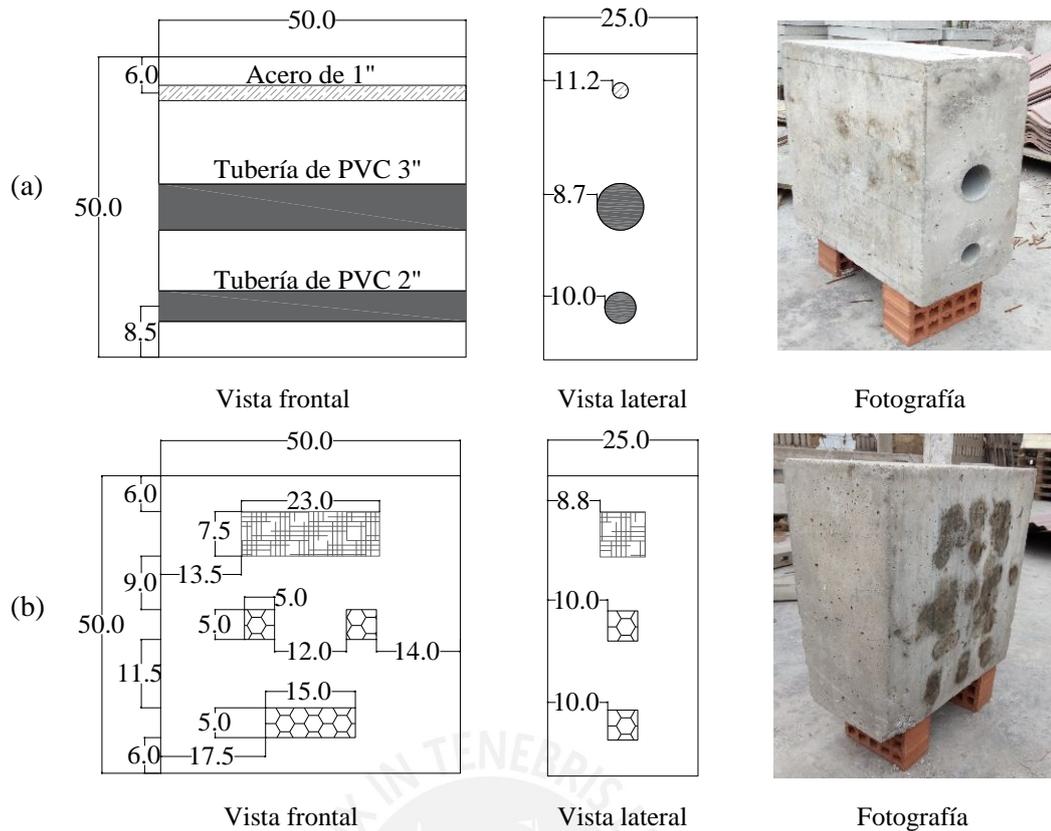


Figura 3.1- Especímenes de concreto ensayados con termografía activa: (a) Bloque tipo I y (b) Bloque tipo II. Adaptado de Lipa y Del Álamo (2015). Unidades en cm.

3.2.2. Muro compuesto de varios materiales con objetos incluidos

Se estudió un muro compuesto por 5 secciones diferentes materiales: (1) concreto, (2) albañilería, (3) piedra, (4) cantería y (5) adobe. Como se muestra en la Figura 3.2, este muro también posee bloques incluidos de los siguientes materiales: (1) madera, (2) concreto, (3) metal y (4) vacío interno. Los bloques están a una profundidad de 25 cm. en las secciones de concreto y piedra, y a 20 cm. en las de cantería, ladrillo y adobe.

Con este caso de estudio se buscó investigar la variación de resultados en la detección de defectos con las mismas características en diferentes medios empleando termografía infrarroja activa. En otras palabras, se decidió investigar la influencia de la conductividad térmica de los distintos materiales de construcción en los ensayos de termografía infrarroja de pulso largo (SH). Asimismo, se pretendió estudiar la transferencia de calor a través de distintos materiales cuando se aplica calor mediante lámparas halógenas y las mejoras que proporciona el uso de esta fuente de calor externa en la visualización de los defectos.

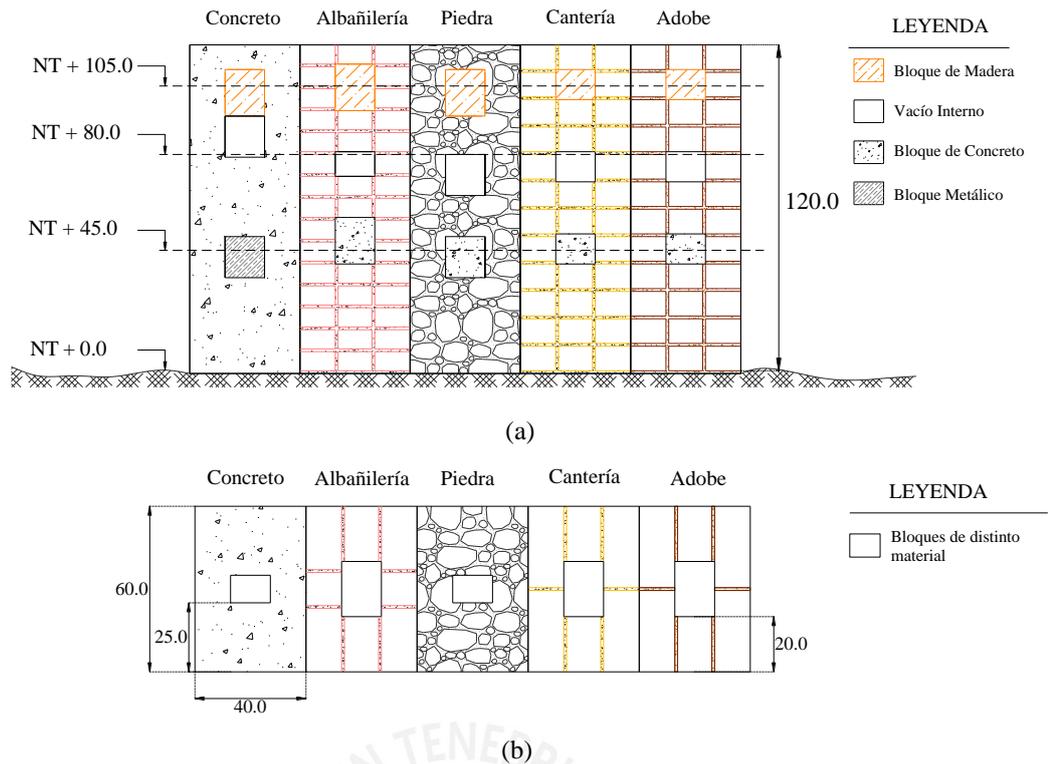


Figura 3.2- Muro compuesto por distintos materiales con defectos incluidos: (a) sección longitudinal y (b) sección transversal típica (Saucedo, 2016). Unidades en cm.

3.3. Equipos y materiales usados

3.3.1. Cámara termográfica

La cámara termográfica usada fue la Flir Systems ThermaCAM T440 (Flir Systems, 2014) que cuenta con una sensibilidad térmica de $0.045\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una temperatura de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es importante añadir que esta cámara termográfica obtiene una fotografía digital de 3.1 Megapíxeles simultáneamente a la toma del termograma, lo que permite efectuar una comparación entre imágenes en el rango visible e infrarrojo.



Figura 3.3- Flir Systems ThermaCAM T440: (a) Vista frontal (b) Vista posterior.

Las especificaciones técnicas más importantes del modelo ThermaCAM T440 están contenidas en la tabla 3.1. El significado físico de cada uno de estos parámetros ha sido revisado en el capítulo 2, dentro de la sección “Características de la cámara termográfica”.

Tabla 3.1- Especificaciones técnicas de la cámara termográfica Flir Systems ThermaCAM T440 (Flir Systems, 2014).

Características	FLIR T440
Rango de Temperaturas	-20°C a 650 °C
Zoom	8x
Cuadros por segundo	60 Hz
Sensibilidad térmica (NETD)	<0.045 °C a 30 °C
Rango Espectral	7.5 a 13 μm
FPA – Microbolómetro no refrigerado	320 x 240 píxeles
Cámara digital integrada	3.1 Megapíxeles

3.3.2. Cámara digital

A pesar de que la cámara termográfica proporciona una fotografía digital, esta es de baja resolución (3.1 Megapíxeles) para la presentación de un reporte profesional de algún ensayo termográfico. Por esta razón es necesario usar una cámara digital que proporcione fotografías de buena resolución. Por lo tanto, para los ensayos presentados en esta tesis se ha empleado una cámara digital marca Canon modelo Powershot S110 con sensor de 12.1 Megapíxeles (Canon Inc., 2012).



Figura 3.4- Cámara digital Sony de 16 megapíxeles: (a) vista frontal y (b) vista posterior.

Las cámaras fotográfica y termográfica estuvieron montadas sobre un trípode, cuyo uso estuvo destinado a proveer estabilidad durante la toma de termogramas y fotografías digitales, evitando la captura de imágenes movidas.

3.3.3. Lámparas halógenas

Se emplearon dos lámparas halógenas de 1000 W de potencia como fuente de calor para los ensayos de termografía activa. Estas lámparas halógenas se caracterizan por poseer ampollas que emiten luz caliente, por lo que fueron usadas para calentar la superficie de los bloques de concreto o muros estudiados. Como se puede observar en la Figura 3.5, las dos lámparas de 1000 W están soportadas por un trípode, lo que facilita su montaje y permite variar su altura y posición de acuerdo a lo requerido por el ensayo termográfico.

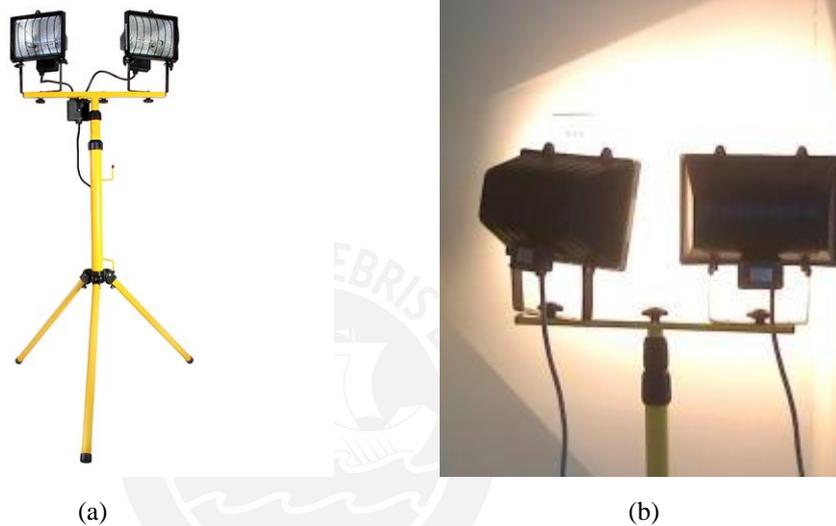


Figura 3.5- Lámparas halógenas de 1000 W: (a) Lámparas halógenas montadas en un trípode y (b) ensayo de termografía activa con lámparas halógenas.

3.3.4. Software para procesamiento de termogramas

Flir Tools (Flir Systems, 2015) es un software libre de post-procesamiento de datos. Este software permite realizar acciones como el cambio de escala cromática, corrección de temperatura reflejada o valores de emisividad. Dentro de los ensayos de termografía pasiva y activa, el uso de este software se destinó al ajuste de las escalas cromáticas de los termogramas para una mejor observación de las anomalías detectadas. Asimismo, también se empleó para la filtración de termogramas que permitían la visualización de algún defecto o material y para la extracción de algunas fotografías digitales.

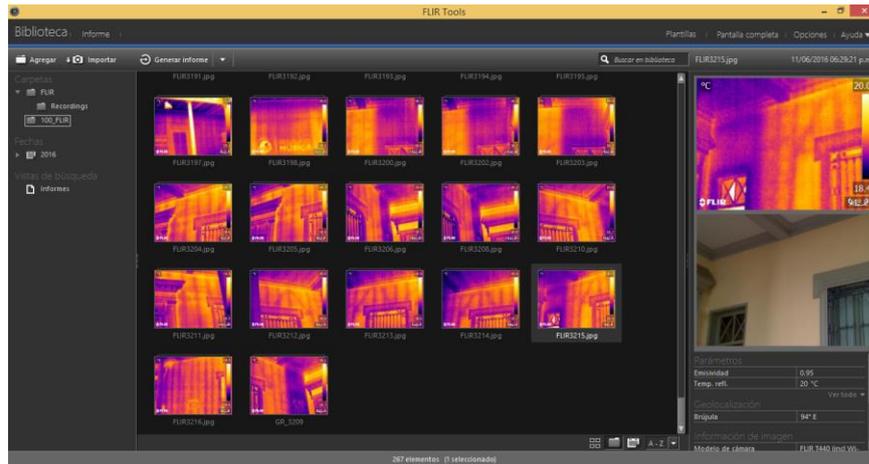


Figura 3.6- Uso de Software FLIR Tools (Flir Systems, 2015).

3.4. Descripción de los ensayos realizados en laboratorio

Se realizaron ensayos de termografía pasiva y activa en los tres casos de estudio en laboratorio con la finalidad de comparar los resultados que proporcionan ambos enfoques en la identificación de inserciones estructurales. El tipo de termografía activa seleccionada fue la termografía de pulso largo o Step Heating (SH) debido a su capacidad de incrementar la profundidad de visibilidad de defectos (Badghaish y Fleming, 2008). Además, la instrumentación para realizar un ensayo SH es significativamente menos costosa en comparación con PT o LT, pues requieren equipos más sofisticados como amplificadores Lock-In o lámparas flash.

Para la realización de los ensayos de termografía infrarroja en laboratorio se emplearon los siguientes equipos: (1) una cámara termográfica marca Flir Systems modelo ThermaCAM T440 (Flir Systems, 2014) con sensibilidad térmica de 0.045 °C a 30°C, (2) dos lámparas halógenas de 1000 W y (3) un trípode de apoyo para las cámaras termográfica y fotográfica. Durante la etapa de post-procesamiento de datos se empleó el software Flir Tools (Flir Systems, 2015).

Los ensayos de termografía pasiva consistieron en la siguiente serie de actividades: (1) inspección visual, (2) toma de termogramas con la cámara termográfica, (3) toma de fotografías digitales y (4) post-procesamiento de los termogramas obtenidos. Por otro lado, los ensayos de termografía activa, además de las actividades mencionadas, incluyeron una etapa de calentamiento de la zona a estudiar con lámparas halógenas luego de la inspección visual.

Los ensayos de termografía activa en los bloques de concreto tuvieron una larga duración de calentamiento debido a que materiales de construcción como el concreto tienen una respuesta muy lenta a cambios de temperatura por su baja conductividad térmica (Wiggenhauser, 2002). Por lo tanto, el ensayo de termografía activa debe realizarse en un espacio de tiempo relativamente largo si se requiere observar defectos a profundidad en especímenes de materiales de construcción como el concreto. La duración de calentamiento en los bloques de concreto (Figura 3.7a) fue de 1 hora con un tiempo de observación con la cámara termográfica de hasta 1 hora luego de desconectada la fuente de calor (Figura 3.7b). Así como en el caso de los bloques de concreto, los ensayos de termografía activa en el muro de distintos materiales (Figura 3.7c) tuvieron una duración de calentamiento y un tiempo de observación de 1 hora. En la Figura 3.7d se puede observar el calentamiento de una sección del muro con las lámparas halógenas de 1000 W.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.7- Ejecución de ensayos de termografía activa: (a) Calentamiento de bloque tipo II; (b) Observación con la cámara termográfica de la superficie estudiada; (c) Muro compuesto por varios materiales; (d) Calentamiento de la sección adobe-cantería del muro compuesto por varios materiales.

3.5. Análisis y discusión de resultados

3.5.1. Bloques de concreto con objetos incluidos

El objetivo de los ensayos de termografía activa en los bloques de concreto fue poder evaluar su capacidad de observación de defectos a profundidad. Para poder afirmar que el resultado de los ensayos de termografía activa fue satisfactorio, los defectos debían ser observados desde la cara frontal de los bloques de concreto. Sin embargo, el termograma correspondiente a la cara frontal del bloque tipo I luego del calentamiento no muestra los objetos tubulares insertados (ver Figura 3.8a). No obstante, como muestra el termograma de la Figura 3.8b, se pudo observar la barra de acero insertada en el bloque desde su cara lateral.

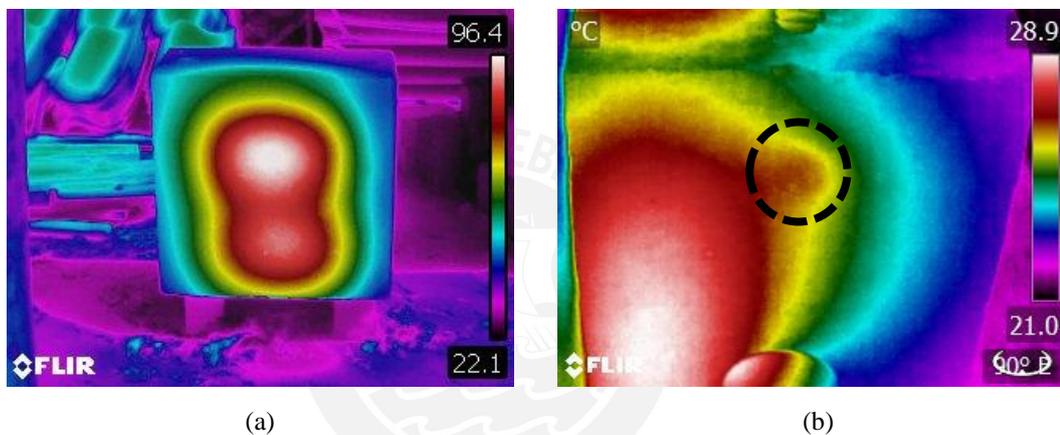


Figura 3.8- Termogramas del bloque de concreto tipo I: (a) termograma de la cara frontal y (b) termograma de la cara lateral.

Por otro lado, los termogramas de termografía activa de los bloques de concreto tipo II no muestran evidencia alguna de los defectos simulados (ver Figura 3.9). En conclusión, no se pudo comprobar que la termografía IR es capaz de detectar defectos en concreto con una profundidad mayor de 8.7 cm con una fuente de calor compuesta por dos lámparas halógenas de 1000 W.

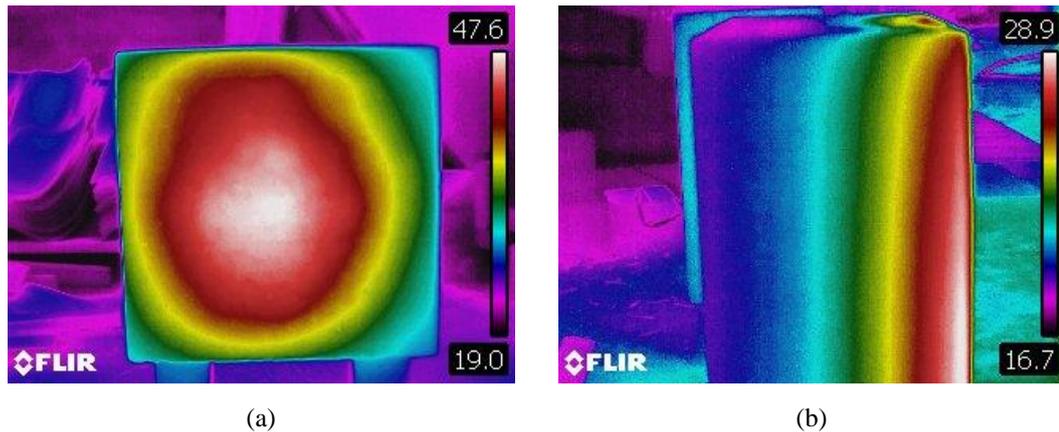


Figura 3.9- Termogramas del bloque de concreto tipo II: (a) termograma de la cara frontal y (b) termograma de la cara lateral.

3.5.2. Muro compuesto por varios materiales con objetos incluidos

El objetivo de los ensayos de termografía activa en este caso de estudio fue estudiar su eficacia para mejorar la visualización de defectos y detectar cambios de material. Además, también se buscó evaluar la influencia de la conductividad térmica en los resultados, debido a que se tenía objetos incluidos de distintos materiales (concreto, metal, madera y vacío) y medios distintos (concreto, albañilería, piedra, cantería y adobe).

Para evaluar la detección del cambio de materiales, se estudió la interfase de cantería y adobe. Los resultados de termografía pasiva y activa se muestran en la Figura 3.10a y 3.10b, respectivamente. Como se puede apreciar, la termografía pasiva no permite visualizar un cambio de material, solo se aprecia la separación cantería-adobe observable en el rango visible, en otras palabras, si el muro tuviese un recubrimiento no podría ser detectado. Por otro lado, el termograma producto de la termografía activa muestra un desfase en la propagación del calor debido a la presencia de dos materiales de construcción con distintas propiedades térmicas, permitiendo la identificación de una interfase.

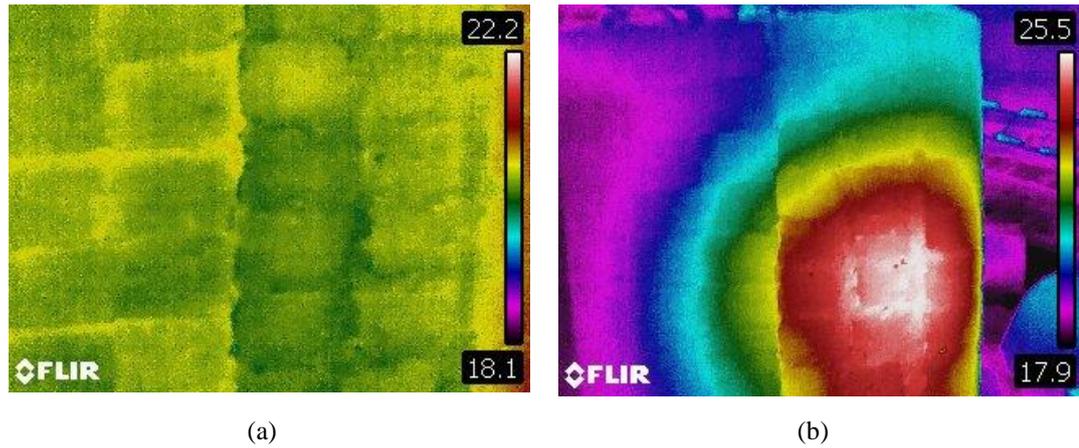


Figura 3.10- Termograma en interfase cantería – adobe: (a) Termografía pasiva; (b) Termografía activa.

Por otro lado, la visualización de defectos superficiales como el desprendimiento fue mejorada notablemente con el uso de la termografía activa (Figura 3.11b), ya que, con la aplicación de termografía pasiva estos defectos fueron casi indetectables (Figura 3.11a).

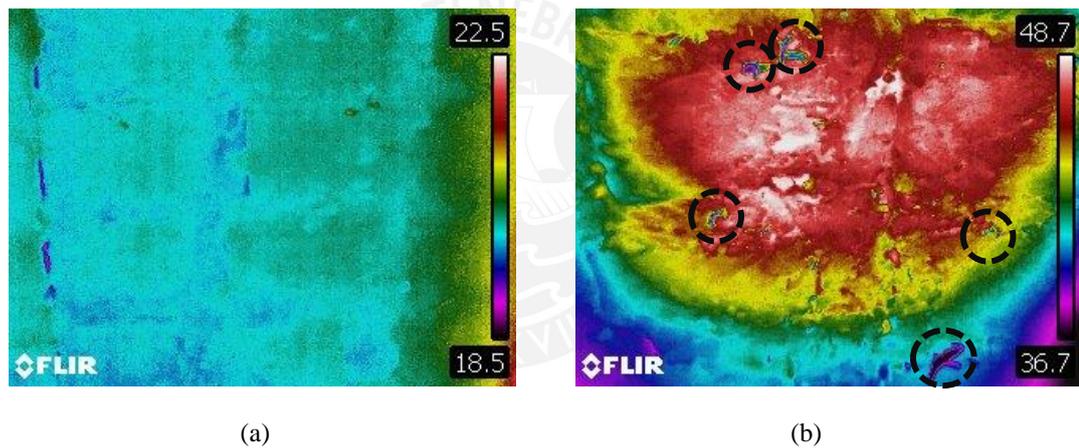


Figura 3.11- Termogramas en adobe: (a) Termografía pasiva; (b) Termografía activa.

Capítulo 4: Propuesta y validación de protocolos de termografía pasiva y activa

Resumen. Este capítulo presenta la propuesta y validación de protocolos de termografía pasiva y activa. Estos protocolos contienen metodologías para la ejecución de ensayos, recolección de datos y post-procesamiento de datos. La validación de los protocolos se realizó mediante su aplicación en el diagnóstico estructural de una casona del siglo XX en Lima y una fachada de un módulo de adobe. Se demostró que el uso de los protocolos propuestos facilitó la ejecución y la recolección de datos durante la campaña experimental de termografía infrarroja. La aplicación de la termografía desde su enfoque pasivo permitió el reconocimiento de zonas de cambio de materiales (por ejemplo, drywall – quincha), detección de sistemas estructurales como la quincha y la visualización de problemas de humedad en muros de adobe de la casona. Por otro lado, la termografía activa demostró proveer más información sobre defectos superficiales en la fachada estudiada del módulo de adobe como grietas y fisura que la termografía pasiva. Finalmente, la aplicación del protocolo de post-procesamiento de datos permitió lograr la integración de fotogrametría y termografía infrarroja proporcionando información sobre la localización de las anomalías detectadas en los termogramas. Esta información espacial de las anomalías es de vital importancia cuando se analiza superficies de grandes dimensiones. En conclusión, los protocolos de termografía pasiva y activa desarrollados y validados en esta tesis pueden ser empleados en el diagnóstico estructural de edificaciones patrimoniales e históricas de adobe y quincha.

4.1. Introducción

Pérez-Sánchez y Piedecausa-García (2016) han demostrado las ventajas que ofrece la aplicación de técnicas no destructivas como la termografía infrarroja en el diagnóstico estructural de edificaciones patrimoniales. Por lo tanto, es vital que los profesionales involucrados en el estudio de edificaciones patrimoniales e históricas posean herramientas que faciliten la ejecución de ensayos de termografía pasiva y activa. Con base en esta necesidad, este capítulo propone protocolos para la ejecución de ensayos de termografía infrarroja pasiva y activa, recolección de datos y post-procesamiento de datos (integración de fotogrametría y termografía infrarroja). Los protocolos desarrollados serán aplicados en la evaluación termográfica de dos casos de estudio para su validación: (1) casona del siglo XX en Lima y (2) una fachada de un módulo de adobe.

4.2. Protocolos de termografía pasiva y activa

4.2.1. Protocolos de ensayos de termografía pasiva y activa

Gracias a la experiencia ganada en los ensayos en laboratorio se propusieron protocolos de ensayos de termografía infrarroja. Estos protocolos consisten en flujogramas que facilitarán la ejecución del diagnóstico estructural de alguna edificación patrimonial aplicando ensayos de termografía infrarroja pasiva y activa. No obstante, los protocolos propuestos también podrían ser aplicados en la inspección termográfica pasiva y activa de edificios modernos. Los flujogramas fueron elaborados en base a la simbología desarrollada por el ASME (American Society of Mechanical Engineers).

4.2.1.1. Termografía pasiva

El ensayo de termografía infrarroja se ha dividido en tres componentes: búsqueda de información y preparación de equipos, recolección de datos y procesamiento de datos. El primer paso propuesto para la primera etapa es la recopilación de información pre-existente de la edificación o construcción a estudiar puesto que es importante conocer de antemano qué tipos de materiales de construcción y sistemas estructurales (mampostería, adobe o quincha) se podrían encontrar. Esto incluye una búsqueda de planos o reportes sobre trabajos de restauraciones que describan la ejecución de alguna intervención de la edificación en estudio. Después, con la ayuda de un plano, se debe

sectorizar la edificación para programar qué ambientes se van a analizar en cada visita con el objetivo de tener un orden en la recopilación de los termogramas y no dejar de estudiar ningún ambiente. Luego, el tercer paso es preparar los instrumentos y equipos a usar. En el caso de termografía pasiva serían los siguientes: (1) cámara termográfica, (2) cámara digital, (3) trípode de soporte para cámara y (4) cinta métrica.

En la etapa de recolección de datos, cuando el operador se encuentra en la edificación, el primer paso que se propone es realizar una inspección visual de los ambientes programados. Si en la inspección visual se encuentran indicios de anomalías estructurales o térmicas como fisuración o hinchamiento de alguna zona de un muro (indicio de humedad), se debe realizar las tomas de termogramas y fotografías correspondientes. La toma de fotografías responde a la necesidad de contar con una imagen digital de buena calidad, ya que, la cámara termográfica arroja una fotografía de baja resolución.

Por último, respecto a la etapa de procesamiento de datos en gabinete, la primera acción a realizarse es filtrar aquellos termogramas que muestren alguna anomalía estructural, anomalía térmica o posibiliten la visualización de algún sistema estructural. Finalmente, cuando se ha analizado todos los ambientes, se debe generar un reporte que describa la metodología empleada, resultados obtenidos y muestre un análisis de resultados. El flujograma de lo expuesto anteriormente se muestra a continuación:

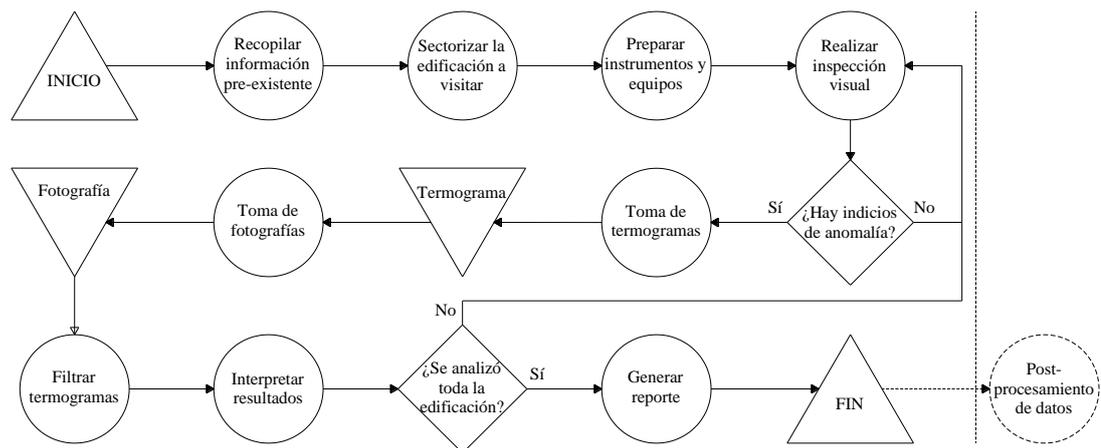


Figura 4.1- Protocolo de ensayos de termografía pasiva.

4.2.1.2. Termografía activa

Para los ensayos de termografía activa se propone el flujograma mostrado en la Figura 4.2. Así como para los ensayos de termografía pasiva, los dos primeros pasos que se

plantean para la etapa de búsqueda de información y preparación de equipos son la recopilación de información pre-existente de la edificación a estudiar y la sectorización de la edificación con ayuda de planos para tener un orden en la recolección de datos. En la etapa de preparación de instrumentos y equipos se debe elegir la fuente de calor que se va a emplear para el calentamiento. La fuente de calor que se recomienda usar consiste en dos lámparas de 1000 W montadas en un trípode de soporte.

En la etapa de recolección de datos, primero se debe realizar una inspección visual con el objetivo de encontrar indicios de anomalías estructurales. Luego de elegida la zona que se va a estudiar, se procede al calentamiento. Se sugiere emplear un calentamiento entre 5 a 15 minutos para la identificación de grietas y fisuras. Además, es importante acotar que la toma de termogramas se debe limitar al área que ha sido calentada. Esto debido al problema que se genera cuando se observa un área mayor a la calentada: observación de un gran contraste que no representa anomalía alguna. La toma de termogramas se puede realizar durante el calentamiento o inmediatamente después de desconectada la fuente de calor si se están estudiando anomalías sub-superficiales.

Por último, la etapa de procesamiento de datos en gabinete consta de los mismos pasos que el protocolo propuesto para los ensayos de termografía pasiva.

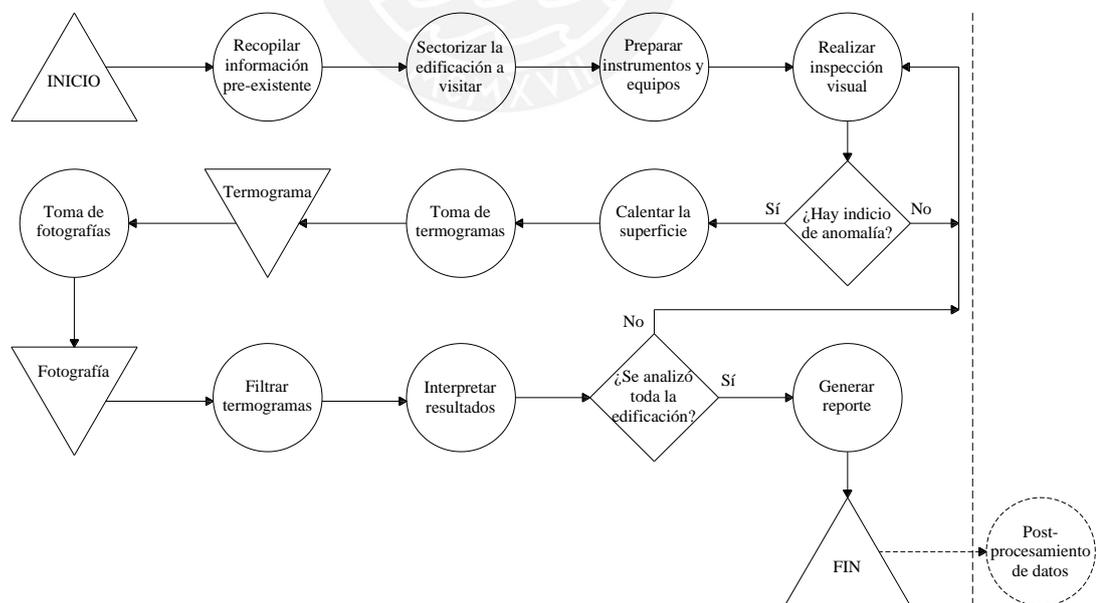


Figura 4.2- Protocolo de ensayos de termografía activa.

4.2.2. Protocolo de recolección de datos

El protocolo de recolección de datos desarrolla con más detalle la etapa referente al ensayo en campo (Figura 4.3). Primero, se recomienda imprimir un plano tamaño A3

de la edificación a visitar, donde se indicará qué sectores se debe analizar en determinada visita. Luego, se debe realizar una inspección visual en busca de indicios de anomalías que puedan ser detectadas por termografía infrarroja. Asimismo, también es importante definir las zonas donde se desea identificar el sistema estructural. Además, es importante acotar que la toma de termogramas se debe realizar necesariamente con el soporte de un trípode para evitar obtener termogramas y fotografías desenfocadas. Asimismo, es vital anotar en el plano A3 de la edificación la ubicación y orientación de la toma, así como el tipo de anomalía observada. Esto debido a que posteriormente esta información tiene que ser colocada en un plano de termogramas que se anexará al reporte. La etapa de recolección de datos culmina cuando se logra estudiar todos los ambientes programados para determinada visita.

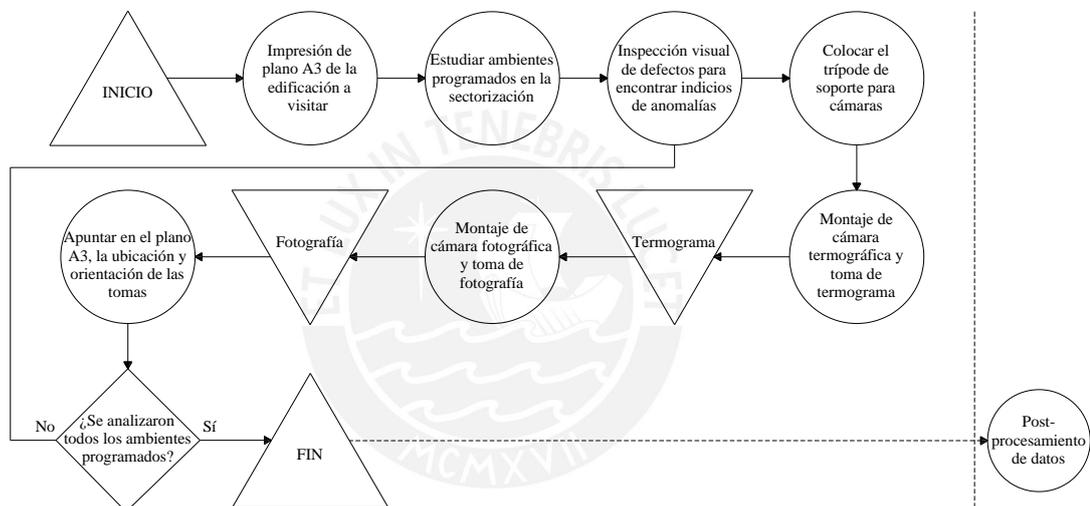


Figura 4.3- Protocolo de recolección de datos.

4.2.3. Protocolo de post-procesamiento de datos

El protocolo de post-procesamiento de datos muestra los pasos para poder desarrollar la integración de termografía infrarroja con fotogrametría (Figura 4.4). La primera etapa que se plantea es la adquisición de datos de entrada donde se obtendrán las fotografías y termogramas. Para la obtención de fotografías terrestres se deben usar cámaras digitales de buena resolución y para las fotografías aéreas, el uso de drones es recomendable. La siguiente etapa es la construcción del modelo 3D a través de fotogrametría. El software recomendado para la construcción del modelo 3D es Agisoft Photoscan (Agisoft LLC., 2011). Por último, para la etapa del texturizado del modelo 3D, se debe exportar el modelo 3D en un formato compatible con el software Keyshot 6 (Luxion Inc., 2015). En este software se debe renderizar el modelo 3D con

el objetivo de generar ortofotos de las fachadas. Finalmente, en AutoCAD (Autodesk Inc., 2014) se deben importar las ortofotos y termogramas, escalar los termogramas y colocarlos sobre el *render* de las fachadas.

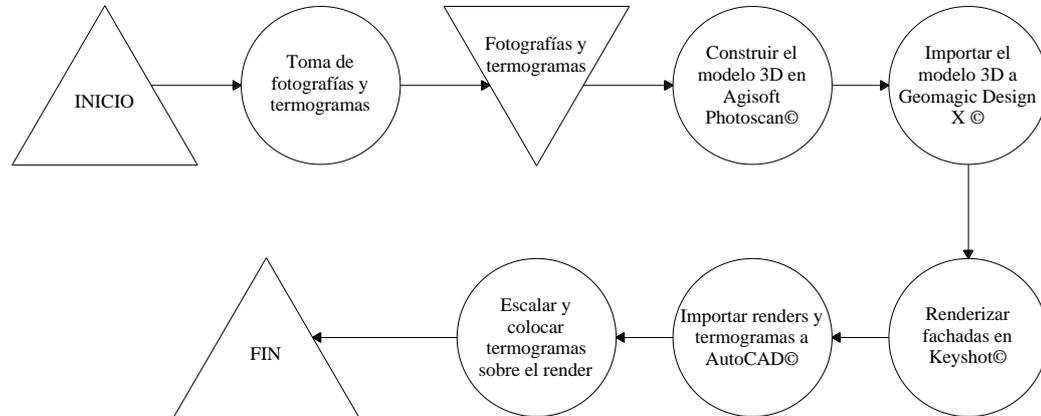


Figura 4.4- Protocolo de post-procesamiento de datos.

4.3. Diagnóstico estructural mediante termografía infrarroja de una casona del siglo XX en Lima como caso de estudio de validación

4.3.1. Descripción del caso de estudio

Los protocolos propuestos para los ensayos de termografía infrarroja pasiva y de recolección de datos se aplicaron en el diagnóstico estructural de una casona del siglo XX en Lima con el objetivo de validarlos. El análisis termográfico que se presentará en este capítulo se realizó dentro del marco de un peritaje estructural de dicha edificación (Aguilar et al., 2016).

El caso de estudio fue una casona ubicada en la ciudad de Lima, en el Malecón Gran Almirante Miguel Grau Seminario N° 477, esquina con la calle Felipe Pardo y Aliaga cuadra 1 y esquina con la calle Santa Teresa cuadra 3. Es importante resaltar que esta edificación es considerada como Monumento Histórico Arquitectónico, por Resolución Ministerial 0928-80-ED dictada el 23 de julio de 1980.

Como se puede apreciar en la Figura 4.5, el uso actual de la edificación es de una escuela de música. La casona sufrió una restauración importante en el 2003 (Huerta Rosales, 2003) así como posteriores adiciones como en el año 2008 y 2014 para adecuar su uso como dicho centro de estudios. Actualmente, posee un total de 21 aulas de clase, zonas de dirección y coordinación, almacenes, depósitos de instrumentos, así

como, ambientes destinados a servicios de los alumnos, personal docente y administrativo

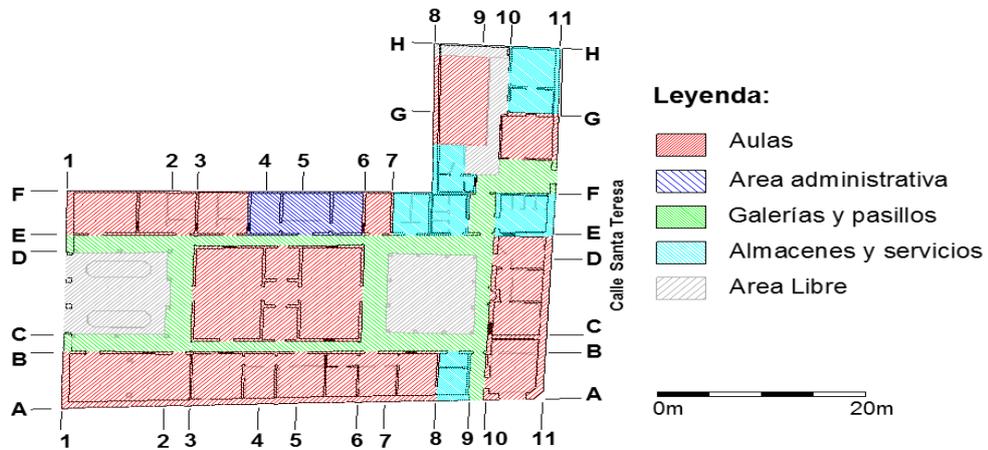


Figura 4.5- Plano en planta mostrando el uso actual de la edificación en estudio (Aguilar et al., 2016).

4.3.2. Descripción de los ensayos

Para la ejecución de los ensayos de termografía pasiva y la recolección de datos se emplearon los protocolos propuestos. Dentro de la primera etapa de búsqueda de información y preparación de equipos, se recolectó toda la información pre-existente acerca de la edificación. La información requerida fue obtenida del informe del proyecto de restauración realizado en el 2003, que incluía planos y fotografías digitales de los trabajos de intervención (Huerta Rosales, 2003). Como resultado final de esta etapa, se elaboró un plano de distribución de materiales inicial (Figura 4.6), donde se aprecian los distintos sistemas estructurales que componen los muros de la casona (mampostería de ladrillo, adobe o muros de quincha).

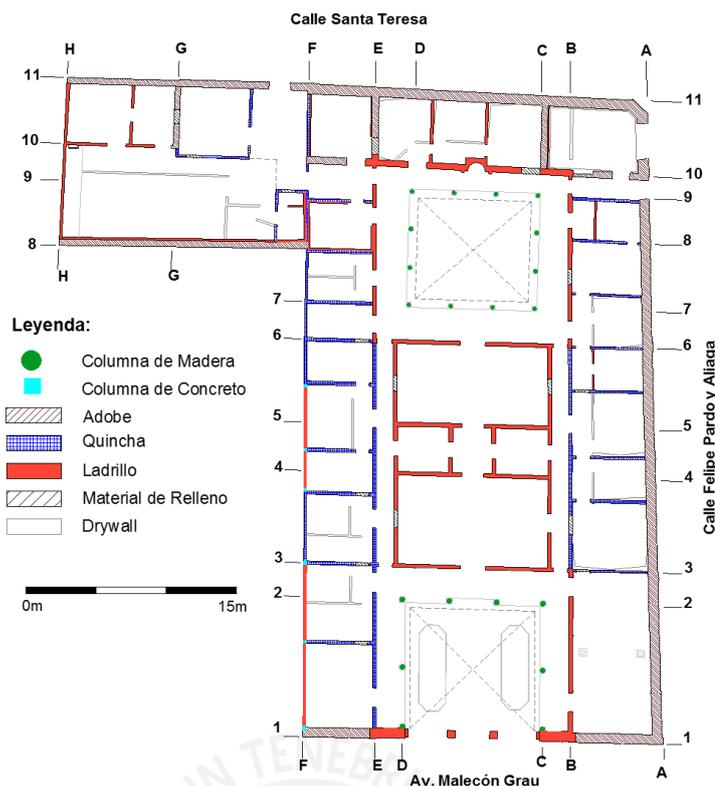


Figura 4.6- Plano de materiales inicial (Aguilar et al., 2016).

En base a este plano se programaron los ambientes que se iban a analizar en cada visita. La sectorización de ambientes priorizó el orden en la recolección de datos y tuvo que tener en cuenta la disponibilidad de los ambientes. Esto debido a que algunas de las visitas se realizaron durante horas de clases y no era posible ejecutar los ensayos de termografía infrarroja en ciertos salones.

Posteriormente, en la etapa de recolección de datos, se realizó una inspección visual de los ambientes programados con el objetivo de identificar qué zonas iban a ser analizadas con termografía infrarroja pasiva. Además de la visualización de anomalías estructurales o térmicas, se buscó ejecutar una caracterización de los sistemas estructurales e identificar cambios de materiales en la casona. Por consiguiente, la campaña termográfica pasiva se enfocó en detectar anomalías estructurales y térmicas y compatibilizar la información del plano de materiales inicial (Figura 4.6). Luego de elegidas las zonas a estudiar, se realizaron las siguientes acciones: (1) colocación de trípode, (2) montaje cámara termográfica en el trípode, (3) toma de termograma (Figura 4.7a), (4) montaje de cámara digital y (4) toma de fotografía (Figura 4.7b). Es importante acotar que con el ajuste de enfoque fino manual de la cámara termográfica se reguló el enfoque de la toma, variándolo de tal manera que la anomalía o sistema

estructural se aprecie de la mejor forma posible. Por último, se anotó la anomalía o sistema estructural observado con termografía infrarroja en un plano, colocando la posición y la orientación de la toma.



Figura 4.7- Ensayo termográfico pasivo: (a) Toma con la cámara termográfica y (b) toma con la cámara digital.

Finalmente, en la etapa de procesamiento de datos en gabinete, se procedió a filtrar los termogramas que mostraban mejor los defectos, sistemas estructurales y cambios de material con la ayuda del software FLIR Tools (Flir Systems, 2015). En el FLIR Tools se ajustó la escala de colores con el fin de mejorar la visualización de las anomalías o materiales. Por último, se generó un reporte para la presentación de los resultados. Asimismo, se elaboró un plano de distribución de los termogramas en AutoCAD (Autodesk Inc., 2014) y un anexo donde se mostraron los termogramas obtenidos.

4.3.3. Análisis y discusión de resultados

A continuación, se muestran los termogramas que permitieron visualizar anomalías estructurales y térmicas, sistemas estructurales y cambios de materiales en la casona de estudio. Además, se presenta el análisis e interpretación de la información contenida en dichos termogramas.

4.3.3.1. Identificación del sistema estructural

i. Quincha

Para identificar la tipología de los muros de quincha de la casona del siglo XX estudiada se ejecutaron ensayos de termografía pasiva. Este método no intrusivo permitió realizar esta identificación de manera eficiente, rápida y con alta confiabilidad. El uso de termografía pasiva también posibilitó reducir el número de

calas necesarias para la identificación del sistema estructural de los muros de la edificación estudiada.

Como se puede apreciar en los termogramas de la Figura 4.8, mediante la aplicación de termografía pasiva se logró identificar los paneles de quincha y el sobrecimiento. Además, fue posible visualizar los elementos verticales (pies derechos), diagonales (tornapuntas) y horizontales (soleras inferiores y superiores). En los termogramas (a), (b) y (c) de la Figura 4.8 se puede apreciar la viga solera superior junto con la conexión con los pies derechos. Gracias a la visualización de estos elementos en el rango infrarrojo se pudo realizar una estimación de la distancia de separación. Asimismo, estos termogramas muestran el tipo de arreglo de las tornapuntas y la presencia de una viga solera inferior. Por otro lado, es importante recalcar que en el termograma (c) de la Figura 4.8 se observa el sobrecimiento (posiblemente de ladrillo), ya que, al efectuar una comparación con la fotografía digital, es evidente que la solera inferior no está al nivel del piso. La altura del sobrecimiento se estimó en aproximadamente 0.40 m.



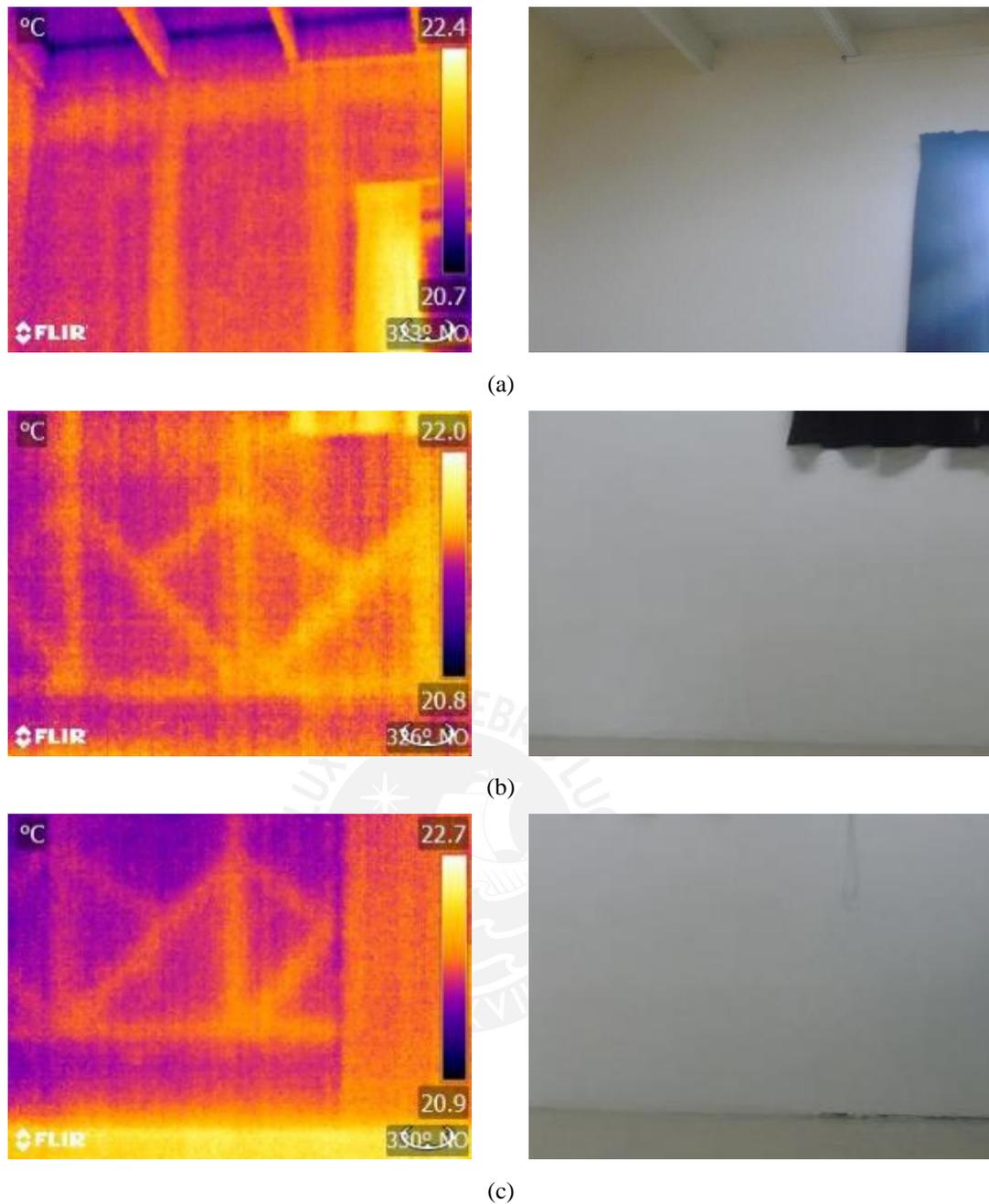


Figura 4.8- Recopilación de termogramas de muro de quincha de un ambiente.

Con la información recopilada del análisis termográfico de los muros de quincha se realizó un esquema de su tipología (Figura 4.9). Es importante mencionar que los muros de quincha de la casona estudiada tienen espesores variables entre 0.15 y 0.25 m con alturas que varían entre 4.00 y 4.50 m.

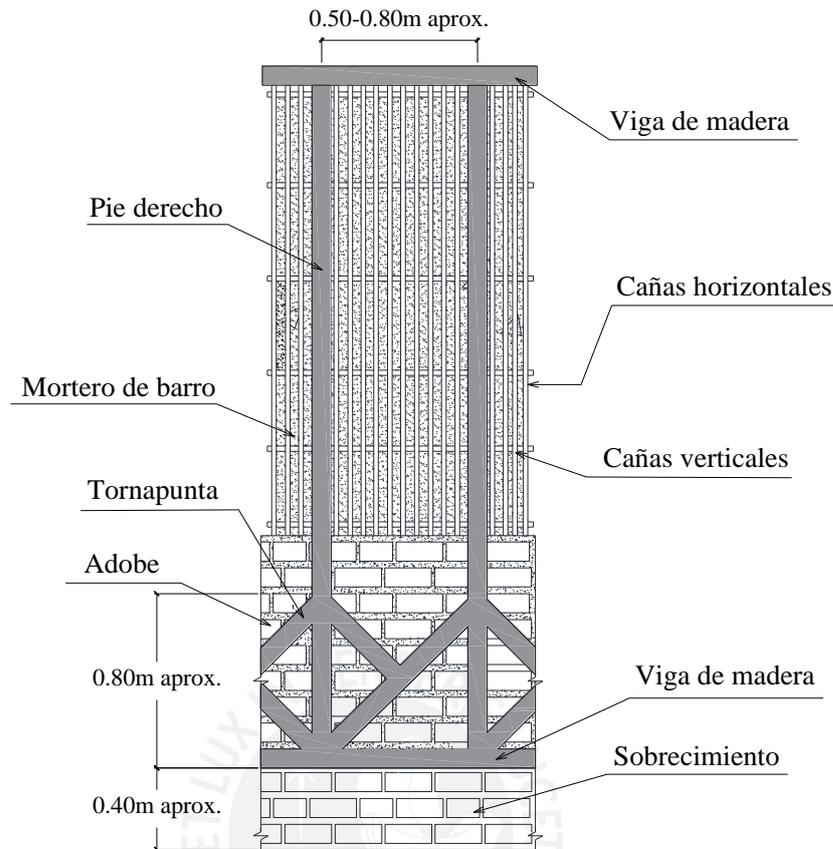


Figura 4.9- Sistema Estructural del muro de quincha (Aguilar et al., 2016).

Por otro lado, el termograma (a) de la Figura 4.10 presenta la disposición de los postes de madera en uno de los muros del patio de la casona. Se puede apreciar que la separación entre los pies derechos es mucho menor que en la tipología mostrada anteriormente. Para estimar esta distancia se procedió a medir una porción del muro y tomar un termograma de dicha porción. Dividiendo el largo del muro entre el número de postes, se obtuvo una separación de aproximadamente 0.55 m. Por otra parte, se encontró una incompatibilidad al comparar la información obtenida con termografía infrarroja pasiva en dos de los muros de la casona con la información del plano de materiales inicial. La información recopilada de los termogramas (b) y (c) de la Figura 4.10 no concuerda con la composición de materiales de estos muros mostrada en el plano de materiales inicial. Por un lado, según el plano de materiales del proyecto de restauración del 2003, se afirma que estos muros son de mampostería de ladrillo. Sin embargo, los termogramas anteriormente mencionados muestran de forma clara los arreglos de madera (postes y tornapuntas). Por lo tanto, se concluye en base a los resultados de la termografía infrarroja pasiva que estos muros son de quincha.

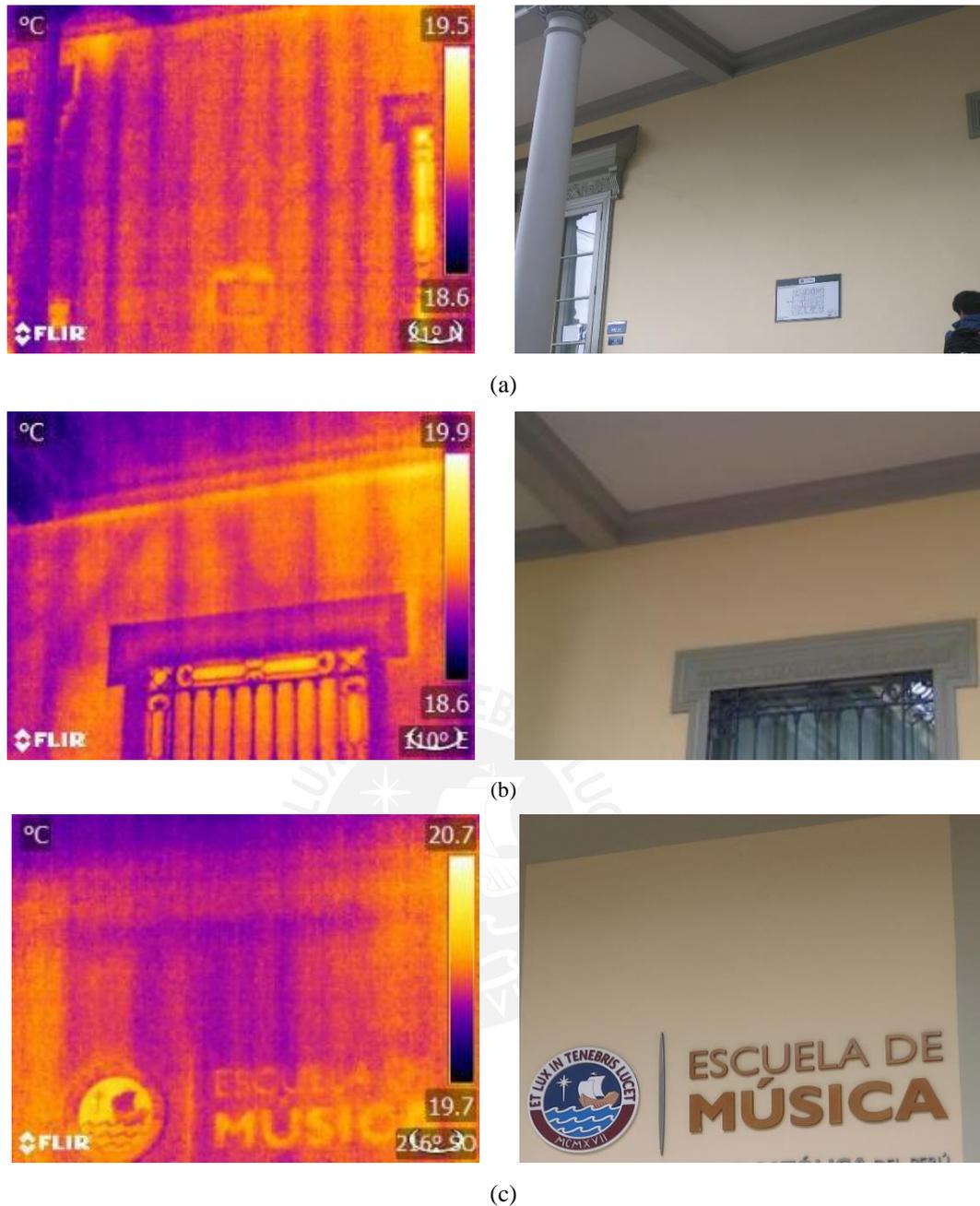


Figura 4.10- Recopilación de termogramas de muros de quincha del patio.

ii. Dinteles

Otros elementos estructurales que pudieron ser observados gracias a la cámara termográfica fueron los dinteles. Los dinteles que pudieron ser identificados fueron los del salón Pompeyano (vanos que dan al interior de la edificación) y de una de las aulas (vanos que dan vista al patio central).

En el termograma (a) de la Figura 4.11 se puede apreciar el dintel del vano correspondiente a una puerta en el salón Pompeyano. Por otro lado, en el termograma

(b) de la misma figura se evidencia la presencia de los dinteles correspondientes a dos vanos de una de las aulas.

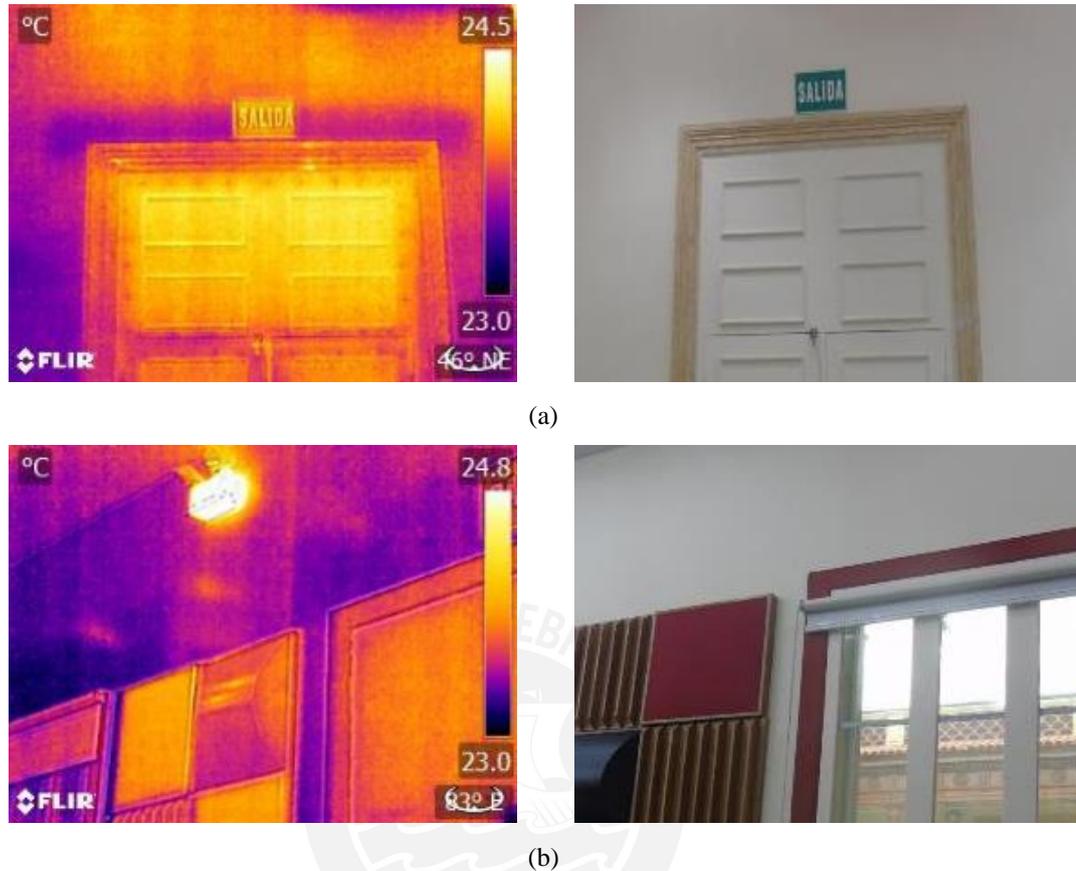


Figura 4.11- Recopilación de termogramas de dinteles.

4.3.3.2. Inspección de anomalías estructurales y térmicas

La inspección de anomalías se enfocó en detectar patologías y anomalías de índole estructural tales como grietas y fisura, anomalías térmicas como la presencia de humedad o calentamiento por presencia de algún equipo y la detección de resanes o cambios de material. La campaña termográfica permitió observar con mayor detalle problemas de humedad, además de una mejor visualización de las grietas del mármol de algunos muros de la casona y ayudó a detectar cambios de materiales imperceptibles a simple vista.

i. Presencia de humedad

Se detectaron problemas de humedad principalmente en los muros y techos. Algunas de estas anomalías fueron detectadas visualmente por un incremento de volumen en la zona afectada. Sin embargo, mediante ensayos termográficos, estos problemas de humedad se aprecian con mayor detalle y se hacen evidentes como en el caso del

termograma (a) de la Figura 4.12. Las zonas afectadas por humedad tienen un color característico más oscuro debido a que en estos lugares la temperatura es menor por la presencia de humedad.

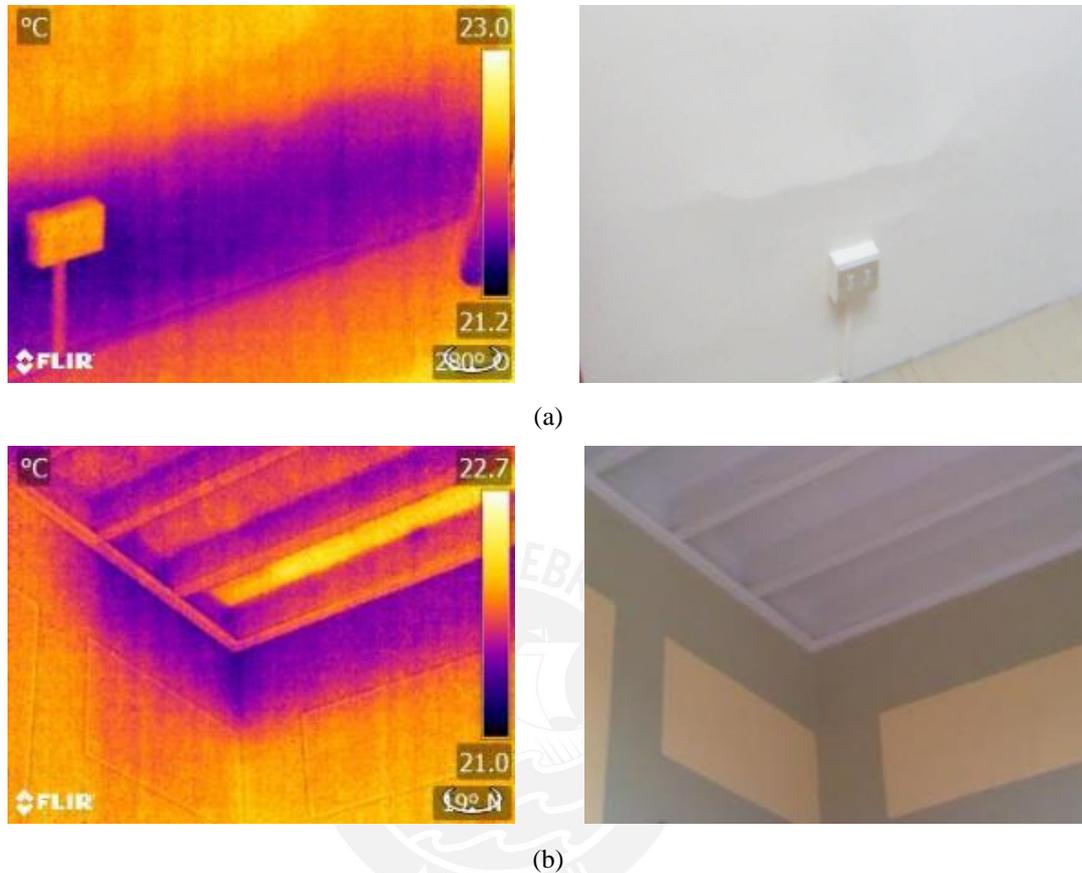


Figura 4.12- Recopilación de termogramas de problemas de humedad.

ii. Desprendimiento y agrietamiento

La inspección termográfica en esta fase del proyecto de diagnóstico se enfocó en la detección de grietas, fisuras y desprendimientos en muros y pisos. Para alcanzar este objetivo se realizó una inspección visual de toda la casona junto con un análisis termográfico de las anomalías detectadas.

En esta etapa del proyecto de diagnóstico estructural, la termografía ayudó a caracterizar las grietas (espesor y hacia donde se propagan) y mejoró la visualización de estos defectos. Un ejemplo de esto último es el termograma (b) de la Figura 4.13, ya que, con la fotografía digital es complicado poder apreciar la grieta en el mármol; sin embargo, la grieta es detectable fácilmente desde un análisis termográfico.

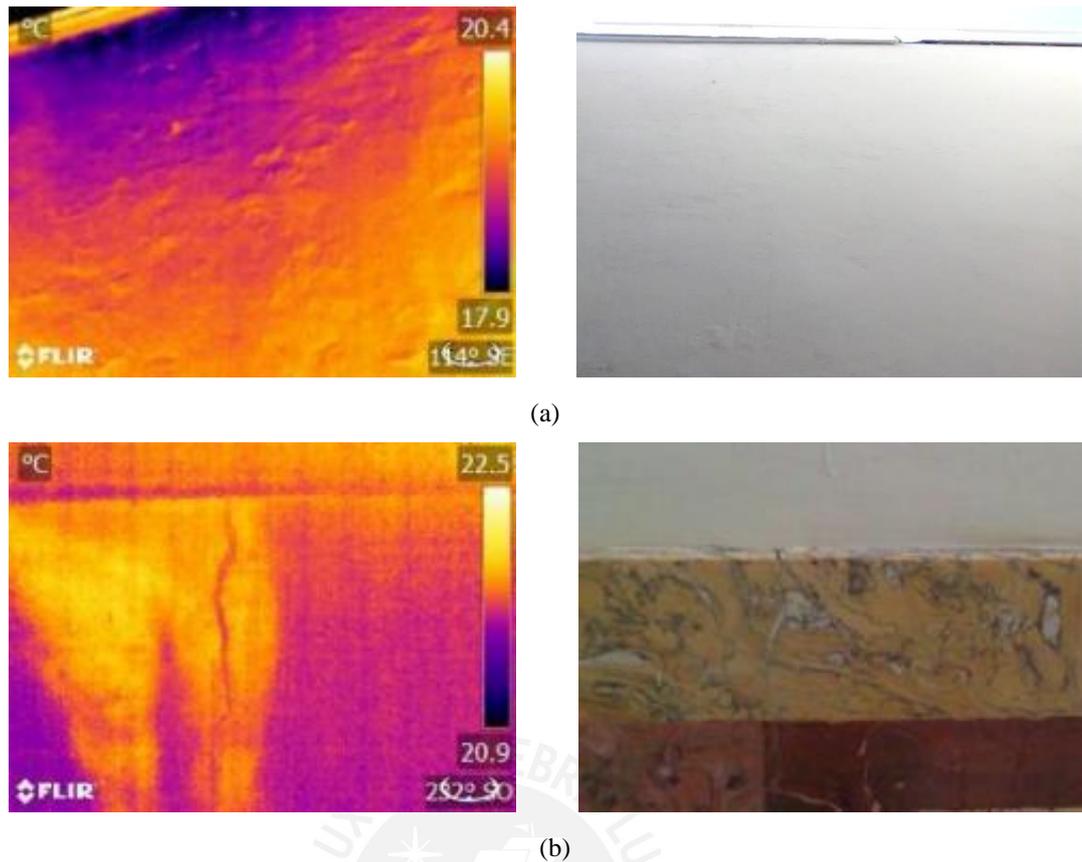


Figura 4.13- Recopilación de termogramas de fisuras y desprendimientos.

iii. Cambios de material

Los cambios de materiales en algunos de los muros de la casona estudiada fueron detectados mediante ensayos de termografía pasiva. Por ejemplo, en el termograma (a) de la Figura 4.14 se puede apreciar el cambio de material quincha-drywall-quincha en el muro. Se afirma esto debido a que existe una sección de color uniforme en la parte central del termograma, donde se supone que debería visualizarse la disposición de maderas característica de los muros de quincha, como en el lado izquierdo y derecho del termograma. De igual manera en el termograma (c) de la Figura 4.14 se observa un cambio de material en la parte baja del muro de quincha, donde la cara externa estaba compuesta por drywall.

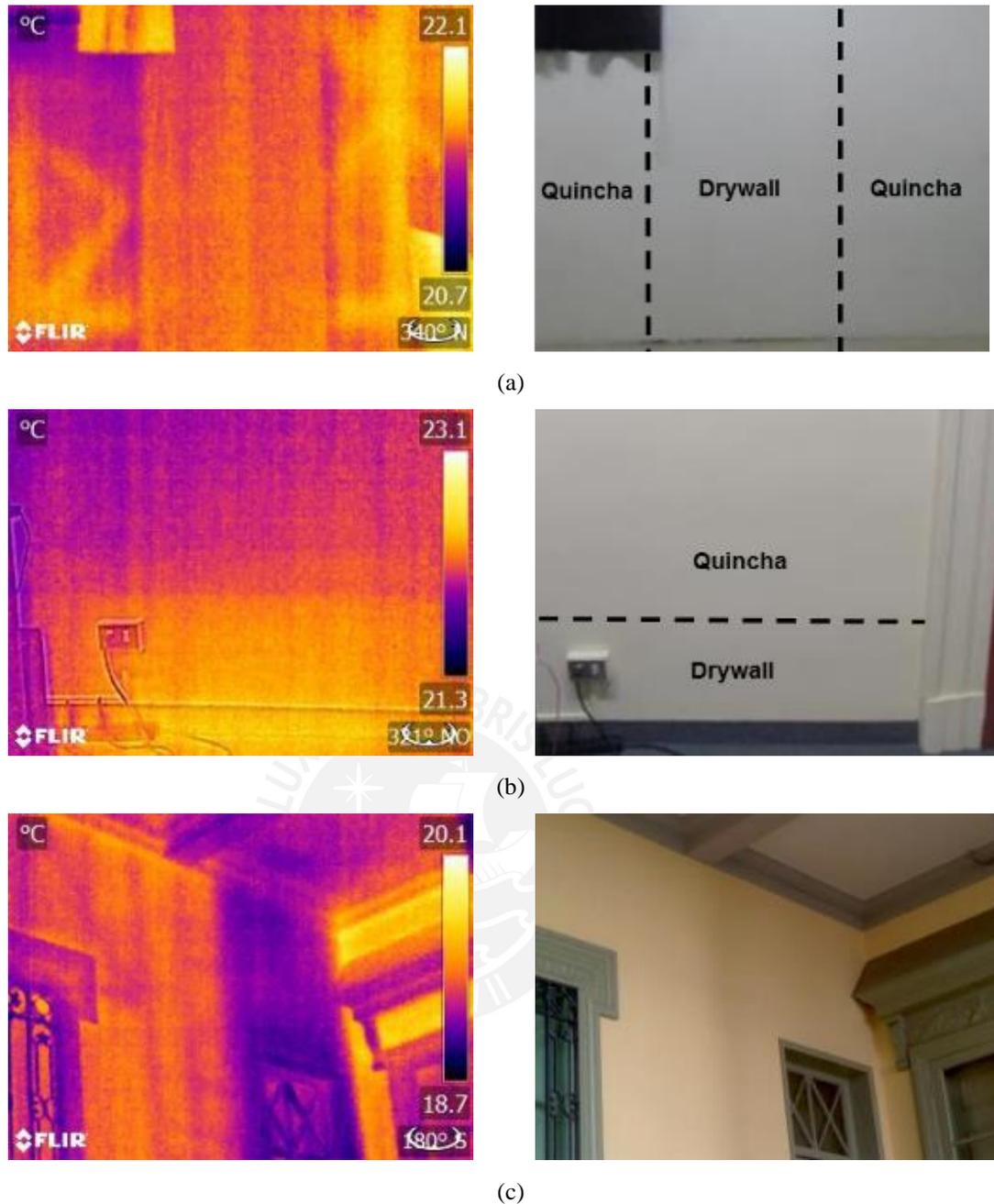


Figura 4.14- Recopilación de termogramas de cambio de material.

Con el análisis e interpretación de los termogramas producto de la campaña termográfica ejecutada en la casona del siglo XX en Lima se elaboraron dos planos. El primer plano consistió en un plano de materiales final generado luego de la compatibilización de los resultados termográficos con el plano de materiales que se obtuvo del reporte de la restauración del 2003 (Huerta Rosales, 2003) (ver Figura 4.15). Por último, el segundo plano consistió en un plano de las anomalías detectadas gracias a la termografía infrarroja e inspección visual (ver Figura 4.16).

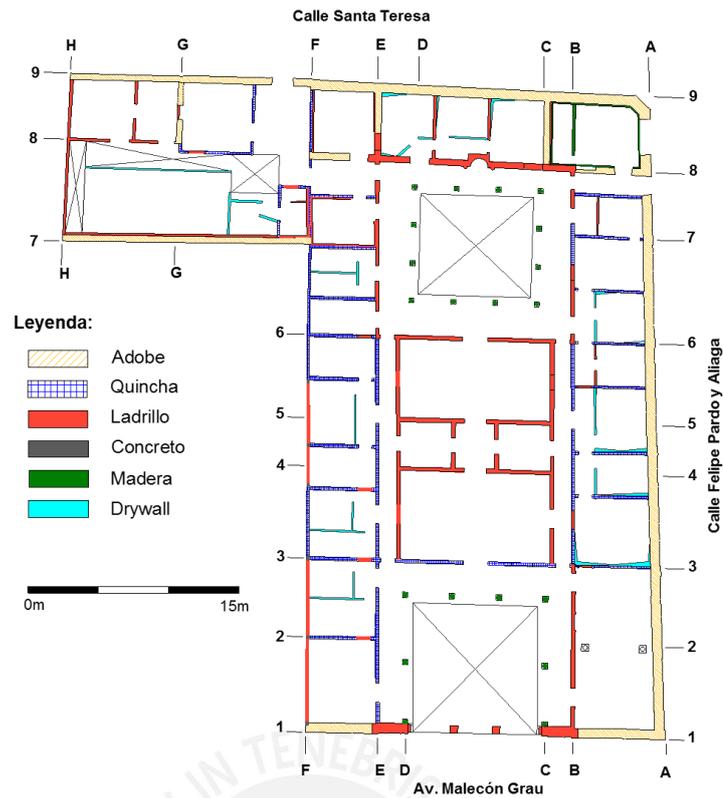


Figura 4.15- Plano de materiales compatibilizado con resultados termográficos (Aguilar et al., 2016).

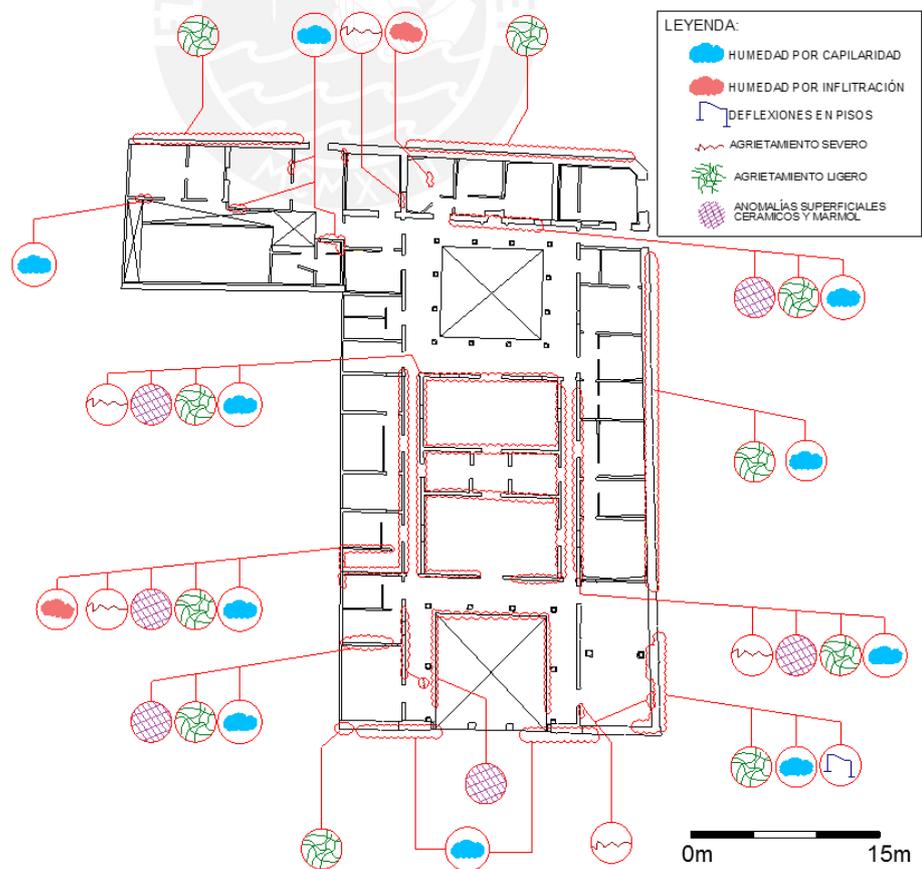


Figura 4.16- Plano de anomalías de la casona del siglo XX (Aguilar et al., 2016).

4.4. Análisis termográfico de la fachada de un módulo de adobe

4.4.1. Descripción del caso de estudio

Este módulo de adobe se encuentra ubicado en la parte posterior del laboratorio de estructuras de la PUCP. Como se puede observar en la Figura 4.17, este módulo de adobe consta de sólo un nivel y posee refuerzo con geomalla visible debido al deterioro de las fachadas como consecuencia de un gran desprendimiento y agrietamiento.

El análisis termográfico de este caso de estudio se enfocó en comparar los resultados obtenidos mediante termografía infrarroja pasiva y activa. Además, permitió la integración de estos dos tipos de termografía con fotogrametría, obteniéndose como producto final una imagen de toda la fachada en el rango infrarrojo.



Figura 4.17- Módulo de adobe: (a) vista frontal y (b) vista posterior.

Debido a que los ensayos termográficos se realizaron en solo algunas fachadas del módulo de adobe, es importante definir una orientación para no generar confusión cuando se muestren los resultados. La orientación propuesta se puede observar en la Figura 4.18.

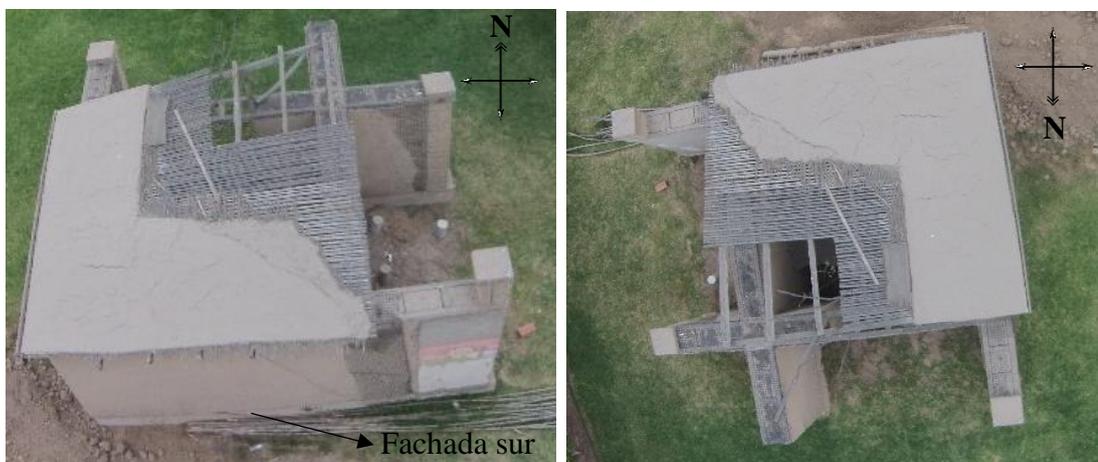


Figura 4.18- Orientación de las vistas del módulo de adobe (Fotografías aéreas).

4.4.2. Descripción de los ensayos

Los protocolos desarrollados para los ensayos de termografía infrarroja pasiva y activa fueron empleados para la ejecución del análisis termográfico de la fachada oeste del módulo de adobe estudiado. Se realizaron ensayos de termografía pasiva y activa con el objetivo de comparar el producto final de ambos métodos. Dentro de los ensayos de termografía activa se empleó un calentamiento con lámparas halógenas de 1000W montadas en un trípode de soporte (Figura 4.19b). La duración del calentamiento empleado para estudiar la fachada oeste del módulo de adobe no fue extensa y tuvo una duración que varió entre 5 a 10 minutos debido a que se buscaba identificar solo defectos superficiales. La toma de termogramas tanto en los ensayos de termografía pasiva y activa se realizó perpendicularmente a la zona estudiada, como ortofotos. Además, se trató de tomar las imágenes térmicas de tal manera que formaran una cuadrícula de la fachada estudiada para facilitar el texturizado posterior. Cabe mencionar que los termogramas obtenidos en esta etapa fueron usados para explorar la integración de la termografía infrarroja con fotogrametría, abordada posteriormente.



Figura 4.19- Ejecución de ensayos de termografía infrarroja en el módulo de adobe: (a) Fachada oeste del módulo de adobe; (b) Calentamiento de la fachada oeste.

4.4.3. Análisis y discusión de resultados

La figura 4.20a y 4.20b muestran los termogramas de una parte de la fachada oeste correspondiente a la parte inferior derecha de la ventana obtenidos con termografía pasiva y activa, respectivamente. Si se comparan los dos termogramas es evidente que el termograma tomado luego de realizado el calentamiento (Figura 4.20b) proporciona mayor información sobre la fisuración de esa sección de la fachada.

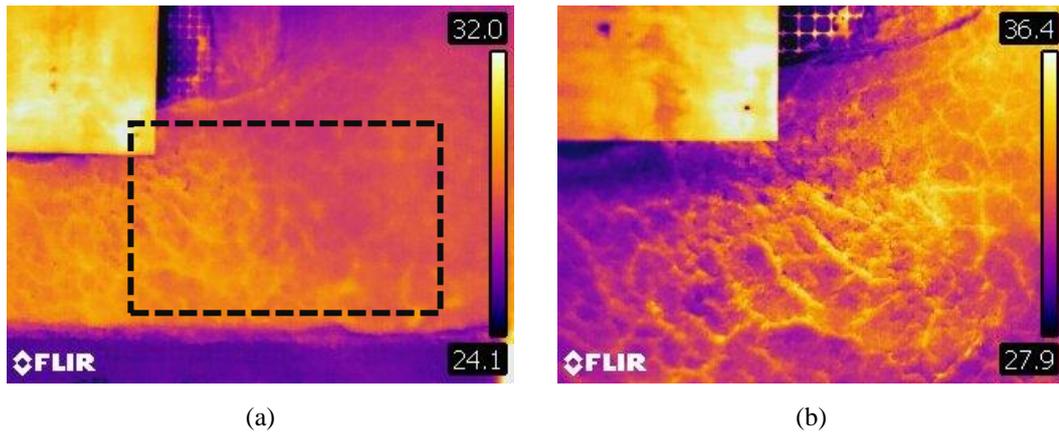


Figura 4.20- Termogramas de parte inferior derecha de la ventana de la fachada oeste: (a) termografía pasiva y (b) termografía activa.

Del mismo modo, como se aprecia en la Figura 4.21, el termograma producto del ensayo de termografía activa (Figura 4.21b) provee más información sobre el agrietamiento. Esto ocurre incluso en una sección de la fachada donde el termograma proveniente de termografía pasiva (Figura 4.21) no logra mostrar anomalía alguna, lo que haría suponer que esa parte de la fachada fuese uniforme y sin ninguna grieta, una suposición errónea.

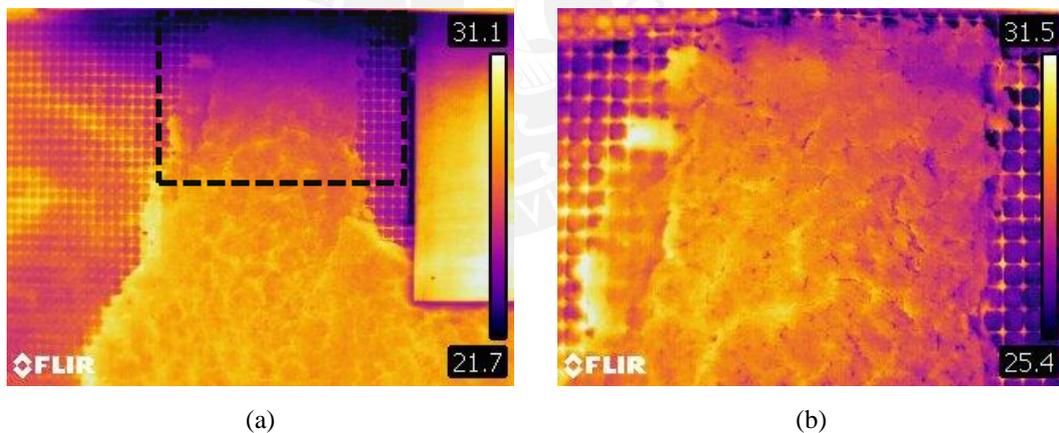


Figura 4.21- Termogramas de parte superior izquierda de la ventana de la fachada oeste: (a) termografía pasiva y (b) termografía activa.

En conclusión, con base en los resultados presentados en las Figuras 4.20 y 4.21, se afirma que el uso de termografía activa logra un notable incremento en la visualización de los defectos superficiales como grietas, fisuras y desprendimientos en comparación de la termografía pasiva. Una posible razón por la que la termografía activa ofrece mejores resultados en la visualización de anomalías estructurales se debe a que el calentamiento de la superficie con las lámparas halógenas acentúa el contraste térmico entre la superficie homogénea sin daño y las zonas con defectos superficiales.

4.5. Integración de termografía infrarroja con fotogrametría

La exploración de la integración de la termografía infrarroja y fotogrametría en el presente caso de estudio corresponde a la necesidad de proveer información espacial a las anomalías observadas en un termograma cuando se estudian construcciones de grandes dimensiones. Esta acción es necesaria debido a que, como se ha podido observar en algunos termogramas mostrados anteriormente, los termogramas suelen centrarse en áreas de inspecciones pequeñas en relación al elemento que se requiere estudiar. Por consiguiente, construir ortoimágenes o modelos 3D y texturizarlos con termogramas tienen la ventaja de dar información espacial de la anomalía observada y discernir si esta corresponde a una irregularidad geométrica (Costanzo et al., 2014).

4.5.1. Obtención de datos de entrada

El primer paso de todo el procedimiento que se siguió fue adquirir información geométrica del módulo de adobe. Para lograr esto se procedió a la toma de fotografías del muro de adobe siguiendo el método de fotogrametría propuesto por Blake, Georgopoulos, & Lerma (2013). La toma de fotografías se realizó de dos formas: (1) con una cámara digital Canon modelo Powershot S110 (Canon Inc., 2012) siguiendo el recorrido mostrado en la Figura 4.22a y (2) con un dron Phantom Vision FC 200 (DJI, 2015) para las fotografías aéreas. El uso del dron fue necesario debido a que era imposible obtener fotografías del techo de forma convencional. Estas fotografías aéreas obtenidas por el dron junto con las tomadas de forma tradicional fueron usadas para construir el modelo 3D del módulo de adobe.



(a)



(b)

Figura 4.22- Fotografías de la casa de adobe: (a) dron y (b) cámara fotográfica.

4.5.2. Procesamiento de datos

4.5.2.1. Construcción del modelo sólido 3D

Para la etapa de la construcción del modelo 3D del módulo de adobe se utilizó el software Agisoft PhotoScan (Agisoft LLC., 2011), un programa avanzado que permite la creación enmallados 3D y la opción de texturizar dicho objeto 3D a partir de información extraída de imágenes en el rango visible (fotografías) (Haskins, 2010). Este programa tiene una interfaz amigable que facilita su manejo. El proceso de la construcción del modelo 3D se compone del siguiente flujo de trabajo: alineamiento de las fotografías, construcción de la nube densa de puntos, construcción de la malla y, por último, la construcción de la textura (Agisoft LLC., 2011).

Primero, se importaron las fotografías digitales al software Agisoft PhotoScan (Agisoft LLC., 2011). El alineamiento de las fotografías realizada por el software consiste en calcular la posición y orientación de la toma de cada fotografía (Figura 4.23). Luego de calcular estos dos parámetros para cada fotografía, se crea una nube de puntos tomando los puntos en común de cada fotografía que el software encontró en la etapa de alineamiento de las imágenes digitales.

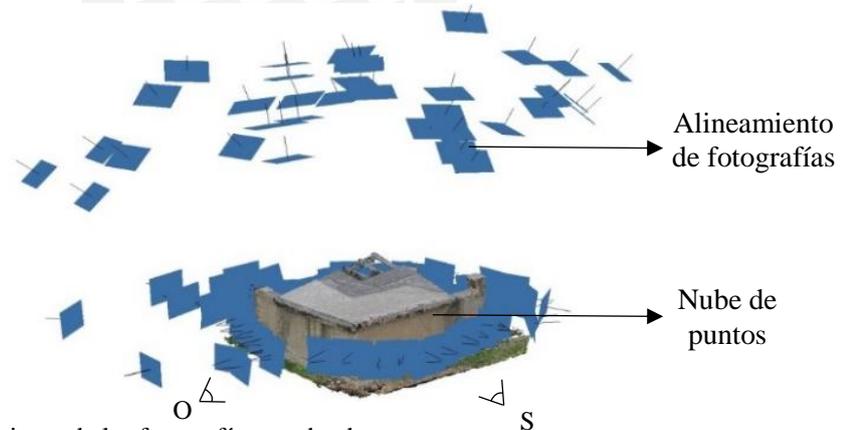


Figura 4.23- Alineamiento de las fotografías y nube de puntos.

Luego de la construcción de la nube de puntos, se pasó a la etapa de la elaboración de la nube densa de puntos. Una vez concluida esta etapa, se eliminó aquellos puntos que no eran parte del módulo de adobe o que fueron creados erróneamente por el software. La filtración de los puntos deseados para el modelo 3D se debe realizar manualmente y constituye uno de los pasos más importantes pues ayuda a mejorar el aspecto estético del modelo 3D. Con la nube de puntos densa filtrada (Figura 4.24a) se procedió a construir el enmallado del muro (Figura 4.24b).

Por último, el software Agisoft PhotoScan (Agisoft LLC., 2011) permite texturizar el enmallado de manera automática con la información de colores contenidas en los puntos que usa el software para construir la nube densa. El resultado final del uso del software Agisoft PhotoScan (Agisoft LLC., 2011) se puede observar en la Figura 4.24 (c). Sin embargo, para los fines que se persiguen, este software no cubre la necesidad de poder texturizar el enmallado con los termogramas, razón por la cual se tuvo que exportar el enmallado producido por Agisoft PhotoScan (Agisoft LLC., 2011) hacia otro software.

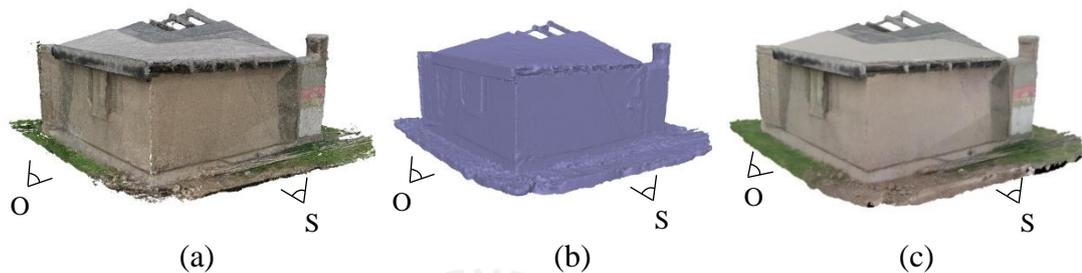


Figura 4.24- Obtención del modelo en 3D en Agisoft PhotoScan (Agisoft LLC, 2011): (a) nube densa de puntos, (b) enmallado, (c) enmallado con textura de colores obtenidos de las fotografías.

4.5.2.2. Texturizado de la fachada oeste del módulo de adobe

Para texturizar la fachada oeste, primero se renderizó una vista perpendicular con el software Keyshot 6 (Luxion Inc., 2015), la cual se muestra en la Figura 4.25a. Luego, en AutoCAD (Autodesk Inc., 2014) se importó la imagen 2D de la fachada oeste y todos los termogramas (termografía pasiva y activa). Luego, los termogramas fueron escalados y colocados sobre la ortofotografía de la fachada oeste. El resultado final es el que se muestra a continuación.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.25- Fachada oeste del módulo de adobe: (a) Ortoimagen 2D de la fachada oeste; (b) Fachada texturizada con termogramas obtenidos mediante termografía pasiva y (c) Fachada texturizada con termogramas obtenidos mediante termografía activa.

Capítulo 5: Conclusiones y trabajos futuros



5.1. Conclusiones

En esta tesis se exploró la termografía infrarroja pasiva y activa como herramienta no destructiva de diagnóstico estructural. Se ejecutaron ensayos de termografía en especímenes en laboratorio y en una construcción patrimonial de tierra, una casona de adobe y quincha del siglo XX en Lima. Además, se propusieron y validaron protocolos de ensayos de termografía infrarroja pasiva y activa, recolección de datos y post-procesamiento de datos.

La termografía infrarroja es un método no destructivo que obtiene información de la distribución de temperatura superficial de un objeto. El contraste térmico observado en un termograma puede representar alguna anomalía estructural, térmica o la presencia de algún material distinto. Asimismo, la termografía infrarroja posee un enfoque pasivo y activo, dependiendo del uso de una fuente controlada de calor durante el ensayo. Además, la termografía activa también se divide en diferentes tipos (PT, PPT, LT o SH) en función a las características de la fuente de calor empleada, la duración del calentamiento y condiciones de observación de la superficie estudiada.

Gracias a los ensayos de termografía pasiva y activa (SH) ejecutados en laboratorio en los dos casos de estudio (bloques de concreto con objetos incluidos y muro compuesto de varios materiales con objetos incluidos) y en el módulo de adobe se puede afirmar que este método desde su enfoque activo mejoró la visualización de anomalías estructurales como grietas y fisuras. Sin embargo, no se pudo demostrar que la termografía activa (SH) permite detectar defectos a una profundidad mayor a 9 cm en especímenes de concreto, ni mayor a 20 cm en muros de adobe y cantería. Aunque el calentamiento y el tiempo de observación luego de desconectada la fuente de calor tuvieron una duración de 1 hora, no se observó ningún defecto simulado por la inclusión de objetos. A diferencia de la termografía activa, con la termografía pasiva no se obtuvo una mejora notable en la visualización de grietas y fisuras respecto a la inspección visual. Esto se debe a que el contraste térmico depende de la cantidad de calor incidente en el objeto en condiciones normales pues no se emplea ninguna fuente de calor controlada. Por consiguiente, se sugiere emplear la termografía activa si se requiere estudiar anomalías estructurales.

Por otro lado, se validaron los protocolos de ensayo de termografía pasiva y recolección de datos mediante su aplicación en el diagnóstico estructural de una casona

de adobe y quincha del siglo XX en Lima y en una fachada de un módulo de adobe. Se demostró que el uso de los protocolos propuestos facilitó la ejecución y la recolección de datos durante la campaña experimental de termografía infrarroja. La aplicación de termografía desde su enfoque pasivo permitió el reconocimiento de zonas de cambio de materiales (por ejemplo, drywall – quincha), detección de sistemas estructurales como la quincha y la visualización de problemas de humedad en muros de adobe.

Finalmente, se puede afirmar que la propuesta de integración de fotogrametría y termografía infrarroja provee información sobre la localización de las anomalías detectadas en un termograma. Esta información espacial de las anomalías es de vital importancia cuando se analiza superficies de grandes dimensiones. Se propuso un protocolo que plantea la metodología para lograr la integración de la termografía infrarroja y fotogrametría. La integración de ambos métodos se obtiene a través del uso de AutoCAD (Autodesk Inc., 2014). En este programa se deben importar las ortofotos (imágenes 2D de un modelo 3D) y los termogramas, escalar los termogramas y colocarlos sobre las ortofotos. El resultado es una imagen 2D texturizada con termogramas.

5.2. Trabajos futuros

Se requiere aún investigación para determinar la máxima profundidad observable de defectos con termografía infrarroja activa en construcciones de tierra. Se recomienda que se utilice ensayos de termografía activa de pulso largo (Step Heating). Los especímenes de laboratorio serían bloques de adobe con objetos incluidos, simulando defectos a profundidad. Se sugiere que estos defectos deben estar a menos de 10 cm. de profundidad pues se ha visto en esta tesis que no se pudo detectar defectos más allá de esa profundidad con termografía SH. Los resultados podrían compararse con los obtenidos por otros ensayos no destructivos que permiten la detección de objetos a profundidad como el radar de penetración de tierra (georadar) o métodos ultrasónicos. Por otro lado, la integración de la termografía infrarroja con la fotogrametría es otra rama de investigación que puede ser explotada en un futuro cercano. Se sugiere trabajar en la automatización del texturizado de los modelos 3D con los termogramas mediante códigos implementados en programas que permitan procesar información proveniente de imágenes como Matlab.

Referencias

3D Systems (2013). Geomagic Design X User's Guide.

Adrover, J. J. H., Fernández, J. R., & Argent, J. S. (2010). Transmisión de calor para ingenieros. Universidad de Castilla La Mancha.

Agisoft, L.L.C. (2011). Agisoft PhotoScan user manual. Professional Edition, Version 0.8.0.

Aguilar, R., Moreira, S., Saucedo, Perea Ema, Gonzáles Mauricio, Rodríguez F. y Silva, G. (2016). Peritaje estructural de la Escuela de música propiedad de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Avdelidis, N. P., Hawtin, B. C., & Almond, D. P. (2003). Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites. *NDT & E International*, 36(6), 433-439.

Aggelis, D. G., Kordatos, E. Z., Soulioti, D. V., & Matikas, T. E. (2010). Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. *Construction and Building Materials*, 24(10), 1888-1897.

American Society of Mechanical Engineers, ASME (1998). *Graphic Symbols For Process Flow Diagrams In Petroleum And Chemical Industries*. ASME Standards, 15.

Autodesk Inc. (2014). AutoCAD 2015 User's Guide.

Badghaish, A. A., & Fleming, D. C. (2008). Non-destructive inspection of composites using step heating thermography. *Journal of Composite Materials*, 42(13), 1337-1357.

Balaras C., Argiriou A. (2002). Infrared thermography for building diagnostic. *Energy and Buildings*, 34, pp. 171-183.

Balageas, D. L. (2007). Termografía infrarroja: una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END). In IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires.

Balageas, D. L., & Roche, J. M. (2014). Common tools for quantitative time-resolved pulse and step-heating thermography—part I: Theoretical basis. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 11(1), 43-56 7

Bilotta, J. (2013). Aplicación de los END: análisis de pérdidas energéticas mediante termografía infrarroja del edificio e instalaciones de la biblioteca de la UPCT (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Cartagena.

Blake, B., Georgopoulos, A., Lerma, J.L. (2014). The CIPA 3x3 rules: The latest version of the 3x3 rules. CIPA Heritage Documentation. [online] http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/pdf/3x3-23_10_2013.pdf [Consulta 12-07-2016].

Bison, P., Bortolin, A., Cadelano, G., Ferrarini, G., Furlan, K., & Grinzato, E. (2012). Geometrical correction and photogrammetric approach in thermographic inspection of buildings. In 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.

Cabrelles, M., Galcerá, S., Navarro, S., Lerma, J. L., Akasheh, T., & Haddad, N. (2009). Integration of 3D laser scanning, photogrammetry and thermography to record architectural monuments. In Proc. of the 22nd International CIPA Symposium (p. 6).

Canon Inc. (2012). Guía del usuario de la cámara PowerShot S110.

Cañas Guerrero, I., Martín Ocaña, S., & González Requena, I. (2003). Aplicabilidad de la termografía para la inspección de los edificios rurales: Caso de una comarca española. *Informes de la Construcción*, 55(488), 21-28.

Costanzo, A., Minasi, M., Casula, G., Musacchio, M., & Buongiorno, M. (2015). Combined use of terrestrial laser scanning and IR thermography applied to a historical building. *Sensors*, 15(1), 194-213.

DJI (2015). Phantom 2 Vision User Manual V1.8.

Esplugas, S., & Chamarro, M. E. (2005). Fundamentos de transmisión de calor. Departament d'Enginyeria Química, Universitat de Barcelona.

Flir Systems. (2015). User's manual FLIR T4xx series.

Flir System. (2015). User's manual FLIR Tools/Tools+ 5.1.

Genest, M., Martinez, M., Mrad, N., Renaud, G., & Fahr, A. (2009). Pulsed thermography for non-destructive evaluation and damage growth monitoring of bonded repairs. *Composite Structures*, 88(1), 112–120.

González, D. A. (2006). Contribuciones a las técnicas no destructivas para evaluación y prueba de procesos y materiales basadas en radiaciones infrarrojas (Tesis de Doctorado). Universidad de Cantabria.

González, B. (2013). Estudio y comparativa de la eficiencia energética de edificios construidos en épocas diferentes en la ciudad de Cartagena (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Cartagena.

Haskins, N. (2010). A field guide to geophysics in archaeology. Oswin, J. Springer-Praxis, Chichester. *Archaeological Prospection*, 17(1), 61-62.

Huerta Rosales, C. (2003). Memoria descriptiva - Proyecto integral de restauración Casa Riva Agüero, Chorrillos : Adaptación a centro cultural y salas de exposición. Lima.

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). Fundamentos de transferencia de calor. Pearson Educación.

Kordatos, E. Z., Exarchos, D. A., Stavrakos, C., Moropoulou, A., & Matikas, T. E. (2013). Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments. *Construction and Building Materials*, 48, 1261-1265.

Kreith, F. (2012). Principios de transferencia de calor. Cengage Learning Editores.

Krenzinger, A. & Vera, L. (2006) . “Desenvolvimento de Software de Pós-Processamento de Imagens Termográficas”. ENCIT, Curitiba. Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering.

Kylili, A., Fokaidis, P. A., Christou, P., & Kalogirou, S. A. (2014). Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, 134, 531-549.

Larsen, S. F., & Hongn, M. (2012). Termografía infrarroja en la edificación: aplicaciones cualitativas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 25-32.

Lerma, J. L., Mileto, C., Vegas, F., & Cabrelles, M. (2007). Visible and Thermal IR Documentation of a Masonry Brickwork Building. *CIPA XXI International*

Symposium. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI-5/C5, 456–459.

Lipa, Leonel & Del Alamo, José (2015). Metodología para la detección de vacíos y medición de espesores en el concreto, por medio del pulso ultrasónico (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú.

Luxion Inc. (2015). Kesyhot 6 User Guide.

Maierhofer, C., Arndt, R., Röllig, M., Rieck, C., Walther, A., Scheel, H., & Hillemeier, B. (2006). Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 28(4), 393- 401.

Maierhofer, C., Brink, A., Röllig, M., & Wiggenhauser, H. (2002). Transient thermography for structural investigation of concrete and composites in the near surface region. *Infrared Physics and Technology*, 43(3-5), 271–278.

Maierhofer, C., Brink, A., Röllig, M., & Wiggenhauser, H. (2003). Detection of shallow voids in concrete structures with impulse thermography and radar. *NDT & E International*, 36(4), 257–263.

Maierhofer, C., Wiggenhauser, H., Brink, A., & Röllig, M. (2004). Quantitative numerical analysis of transient IR-experiments on buildings. *Infrared Physics and Technology*, 46(1-2 SPEC. ISS.), 173–180.

Maldague, X. P. (2002). Introduction to NDT by active infrared thermography. *Materials Evaluation*, 60(9), 1060-1073.

Maldague, X., Galmiche, F., & Ziadi, A. (2002). Advances in pulsed phase thermography. *Infrared physics & technology*, 43(3), 175-181

Meola, C., Di Maio, R., Roberti, N., & Carlomagno, G. M. (2005). Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. *Engineering Failure Analysis*, 12(6), 875-892.

Navarro, D. (2014). Análisis no invasivo de las patologías de un edificio en la ciudad de Valencia a través de la termografía infrarroja (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia.

- Perez-Sanchez, J. C., & Piedecausa-Garcia, B. (2016). Infrared thermography applied to historical domes: identification and analysis of building systems. *Informes de la Construccion*, 68(541).
- Roche, J. M., & Balageas, D. (2014). Common tools for quantitative pulse and step-heating thermography-Part II: experimental validation. In *The 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT 2014)*.
- Sakagami, T., & Kubo, S. (2002). Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative nondestructive evaluations. *Infrared Physics & Technology*, 43(3), 211-218.
- Saucedo, Cristhian (2016). Construcción de tomografías usando metodologías sónicas como herramientas para el diagnóstico estructural de monumentos históricos (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica.
- Shepard, S. M., Lhota, J. R., Rubadeux, B. A., Ahmed, T., & Wang, D. (2002). Enhancement and reconstruction of thermographic NDT data. In *Thermosense XXIV* (Vol. 4710, pp. 531-536). International Society for Optics and Photonics.
- Sun, J. G. (2006). Analysis of pulsed thermography methods for defect depth prediction. *Journal of Heat Transfer*, 128(4), 329-338.
- Wiggenhauser, H. (2002). Active IR-applications in civil engineering. *Infrared Physics & Technology*, 43(3), 233-238.
- Wu, D., & Busse, G. (1998). Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials. *Revue Générale de Thermique*, 37(8), 693-703.