ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

SIMULACIÓN DE UNA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA DE UNA CONFIGURACIÓN ESPECÍFICA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

GALO EDWIN ARIAS HERMIDA

galo.arias@epn.edu.ec

PAÚL ALEJANDRO CARRASCO TORRES

alejito2160@hotmail.com

DIRECTOR: ING. MARÍA VERÓNICA SOTOMAYOR, M.Sc.

veronica.sotomayor@epn.edu.ec

Quito, Septiembre 2016

DECLARACIÓN

Nosotros, **Galo Edwin Arias Hermida, Paúl Alejandro Carrasco Torres**, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Arias Hermida Galo Edwin

Carrasco Torres Paúl Alejandro

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **GALO EDWIN ARIAS HERMIDA y PAÚL ALEJANDRO CARRASCO TORRES** bajo mi supervisión.

Ing. Verónica Sotomayor, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre, por demostrarme siempre su cariño y su apoyo incondicional desde el principio de mi carrera sobre todo por jamás dejarme decaer ni vencer. A mi padre, quien es el pilar fundamental en mi educación y me enseño con su ejemplo y dedicación ser el hombre correcto que soy. A mi hija, por ser mi inspiración diaria por quien día a día quiero ser una excelente persona buscando lo mejor que puedo darle. A mi esposa, por su amor incondicional que es aliciente que me hace seguir adelante y por siempre estar dispuesta a ayudarme y a escucharme en los momentos más difíciles que he tenido. A mis suegros, por extenderme esa mano amiga que me permitió seguir hasta donde estoy. A mis hermanos, por brindarme siempre su cariño y afecto.

Paúl Alejandro Carrasco Torres

Dedico este proyecto a mis padres Galo y Eugenia por toda su entrega y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. A mi hermano Luigi por su amor y acolite en los momentos difíciles.

A mi novia Carolina que me impulso a seguir adelante en los momentos de fatiga, ella ha sido quien me instruyo a seguir por mis ideales.

Galo Edwin Arias Hermida

AGRADECIMIENTO

A Dios, por acompañarme todos los días. A mi Madre quien más que una buena madre ha sido mi mejor amiga, me ha consentido y apoyado en lo que me he propuesto y sobre todo ha sabido corregir mis errores.

Agradezco también a mi Padre por ser ese apoyo en mi carrera, en mis logros, en todo, que aun estando lejos lo llevo siempre en mi corazón y mente.

A mi esposa, que durante estos años de carrera ha sabido apoyarme para continuar y nunca renunciar, gracias por su amor incondicional y por su ayuda en mi proyecto.

A mi hija, quien es mi inspiración diaria, la personita que me inyecta esa fuerza y esas ganas de seguir y por quien lo haría todo en esta vida.

Y gracias a todos los que nos brindaron su ayuda en este proyecto.

Paúl Alejandro Carrasco Torres

Agradezco a Dios por haberme dado una familia tan compresible y amorosa; ellos han sido el pilar fundamental en todo lo que me he propuesto.

A la empresa FLEXIPLAST S.A. Al área de mantenimiento; y a los Ingenieros Arturo Sánchez y Wilson Toapanta, ya que sin ellos este proyecto no hubiera sido posible.

Galo Edwin Arias Hermida

CONTENIDO

Declaración ii

Certificación iii

Dedicatoria iv

Agradecimiento v

Resumen xiii

Presentación xiv

CAPÍTULO 1. TERMOGRAFÍA COMO ENSAYO NO DESTRUCTIVO 1

1.1 Introducción ensayos no destructivos 1

1.2 Tipos de ensayos no destructivos (END) 2

1.2.1 Inspección visual (VT) 2

1.2.2 Líquidos penetrantes (PT) 2

1.2.3 Partículas magnéticas (MT) 3

1.2.4 Corrientes inducidas (ET) 4

1.2.5 Radiografía (RT) 4

1.2.6 Ultrasonido (UT) 5

1.2.7 Emisión acústica (AE) 6

1.2.8 Termografía infrarroja (IR) 6

1.3 Termografía infrarroja (IR) 6

1.3.1 Evolución y origen histórico 6

1.3.2 Conceptos básicos relacionados 8

1.3.3 Ventajas y desventajas del ensayo de termografía infrarroja 14

1.3.4 Procedimiento de un ensayo termográfico 16

1.3.5 Clasificación de la termografía TIR 17

1.3.6 Defectos y detectabilidad con termografía TIR 19

1.3.7 Tratamiento de imágenes termográficas IR 21

1.4 Aplicaciones 24

1.5 Equipos utilizados 28
1.5.1 Cámaras termográficas 28
1.5.2 Partes de una cámara termográfica..... 29
CAPÍTULO 2. INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA EN ESTRUCTURAS O EDIFICACIONES 30
2.1 Principales defectos en edificaciones..... 30
2.2 Inspección térmica de altas temperaturas en estructuras industriales 31
2.3 Termografía para el sector de la construcción 31
2.3.1 Defectos de aislamientos y fugas de aire 32
2.3.2 Detección de fugas de aire 35
2.3.3 Detección de humedad..... 35
2.3.4 Puentes térmicos..... 36
2.3.5 Calefacción y lineas de abastecimiento..... 37
2.3.6 Localización de filtraciones de agua en tejados planos. 38
2.3.7 Localización de fugas en la calefaccion del suelo 39
2.3.8 Control de calidad..... 40
2.3.9 Rehabilitación de edificios 40
2.3.10 Tuberías 40
2.3.11 Instalación de climatización..... 41
2.3.12 Fallos eléctricos..... 42
2.4 Selección de la configuración a simular 43
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN TERMOGRÁFICA..... 45
3.1 Desarrollo analítico..... 46
3.2 Aplicación de software de simulación por elementos finitos ansys 51
3.2.1 Levantamiento de planos..... 51
3.2.2 Identificación de parámetros mediante el software ansys 51
3.2.3 Caracteristicas del análisis por estudio de emisividad..... 52

3.2.4 Interpretación de resultados 52
3.2.5 Conducción, convección, radiación y emisividad de los materiales .. 53
3.2.6 Procedimiento para generar un análisis térmico 53
3.2.7 Ejecución de análisis térmico a una configuración específica 54
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS 66
4.1 Configuración analizada 71
4.2 Hermeticidad 74
4.3 Filtración de agua 76
4.4 Grietas 78
CAPÍTULO 5. CONSIDERACIONES DE UN PROCEDIMIENTO GENERAL DE INSPECCIÓN 80
5.1 Captación de imágenes termográficas. 81
5.2 Informe 81
5.3 Procedimiento general para realizar un análisis termográfico 83
5.3.1 Alcance 83
5.3.2 Formato 83
5.3.3 Consideraciones de la cámara termográfica 84
5.3.4 Análisis termográfico 84
5.3.5 Ejemplo de análisis de configuraciones realizadas 85
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 86
6.1 Conclusiones 86
6.2 Recomendaciones 87
Referencias bibliográficas 88
Anexos 94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Composición de la técnica de END por líquidos penetrantes. 3
Figura 1-2 Composición de la técnica de END por partículas magnéticas 3
Figura 1-3 Composición de la técnica de END por corrientes inducidas 4
Figura 1-4 Composición de la técnica de END por radiografía 5
Figura 1-5 Radiómetro termográfico de infrarrojos. 8
Figura 1-6 Espectro electromagnético. 11
Figura 1-7 Procedimiento de imágenes por TIR activa. 18
Figura 1-8 Imagen infrarroja. 20
Figura 1-9 Termogramas a t = 348 msg 22
Figura 1-10 Termogramas 23
Figura 1-11 resultados de segmentación 24
Figura 1-12 Termografía en construcciones. 24
Figura 1-13 Termografía en cubiertas de viviendas. 25
Figura 1-14 Detección termográfica en inspecciones mecánicas 25
Figura 1-15 Comparación de emisión de energía infrarroja en una taza con una cinta adhesiva 29
Figura 1-16 Elementos constitutivos de una cámara termográfica. 29
Figura 2-1 Aislamiento en una edificación tipo sándwich. 32
Figura 2-2 Falta de aislamiento en estructura de construcción. 32
Figura 2-3 Techo con aislamiento. 33
Figura 2-4 Almacén con aislamiento en la parte superior. 33
Figura 2-5 Falta aislamiento en partes del muro. 34
Figura 2-6 Termografía de objetos en el exterior. 34
Figura 2-7 Aislamiento insuficiente en el muro bajo la ventana. 35
Figura 2-8 Fugas de aire entre el techo y la ventana 35
Figura 2-9 Filtración de humedad en el suelo. 36
Figura 2-10 Imágenes termográficas tomadas del mismo techo. 36
Figura 2-11 Puente térmico en uno de los pisos. 37
Figura 2-12 Puentes térmicos entre las vigas del techo y paredes adyacentes. .. 37
Figura 2-13 Defectos de sistemas de calefacción central. 38
Figura 2-14 Termografía tomada a una pared con una ventana abierta con la luz encendida (noche). 38

Figura 2-15 Filtraciones de agua. 39
Figura 2-16 Diferencia de temperaturas por actividad radiante. 39
Figura 2-17 Termografía con problemas de calefacción por suelo radiante. 39
Figura 2-18 Termografía en estructuras subyacentes. 40
Figura 2-19 Tuberías con termografía. 41
Figura 2-20 Climatización. 41
Figura 2-21 Fusibles sobrecalentados. 42
Figura 2-22 Configuración ladrillo – acero. 43
Figura 3-1 Mallado. 45
Figura 3-2 Pasos análisis de elementos finitos. 45
Figura 3-3 Conducción unidimensional en estado transitorio. 46
Figura 3-4 Solución analítica. 49
Figura 3-5 Configuración establecida (Solidworks). 55
Figura 3-6 Biblioteca predeterminada de materiales. 55
Figura 3-7 Introducción de parámetros iniciales (manualmente). 56
Figura 3-8 Unidades e importación de elemento a estudiar. 56
Figura 3-9 Modelo 3D – ANSYS. 57
Figura 3-10 Asignación de material para cada elemento a analizar. 57
Figura 3-11 Definición de solución de análisis a la configuración. 58
Figura 3-12 Propiedades y elaboración de mallado. 59
Figura 3-13 Mallado final. 59
Figura 3-14 Diagrama con 5000 iteraciones 60
Figura 3-15 Diagrama con 1000 iteraciones. 60
Figura 3-16 Diagrama con 200 iteraciones. 61
Figura 3-17 Diagrama de 10 iteraciones. 61
Figura 3-18 Propiedades para cada elemento de la configuración. 62
Figura 3-19 Parámetro de convección de aire. 63
Figura 3-20 Proceso de simulación. 63
Figura 3-21 Solución del problema de simulación. 64
Figura 3-22 Simulación por cuadros. 65
Figura 3-23 Imagen final de la simulación. 65
Figura 4-1 Modelo matemático del ladrillo. 67
Figura 4-2 T vs. t (excel). 70

Figura 4-3 T vs. t (ANSYS)..... 71
Figura 4-4 Imagen termográfica. 80
Figura 4-5 Imagen simulada…. 73
Figura 4-6 Imagen termográfica... 81
Figura 4-7 Imagen simulada….. 74
Figura 4-8 Transferencia por capas. 82
Figura 4-9 Análisis interno…….. 75
Figura 4-10 Imagen termográfica. 83
Figura 4-11 Imagen simulación. 76
Figura 4-12 Transferencia por capas 84
Figura 4-13 Análisis interno…… 77
Figura 4-14 Imagen Simulada. 78
Figura 4-15 Grieta (Zona 1)… 85
Figura 4-16 Grieta (Zona 2)..... 78
Figura 4-17 Análisis interno total. 79
Figura 4-18 Análisis interno focal. 79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Emisividad de materiales 13
Tabla 3-1 Procedimiento para generar un análisis térmico 53
Tabla 4-1 Datos obtenidos de las fórmulas de temperatura (°C) en excel. 70

RESUMEN

En Ecuador, la inspección termográfica de edificaciones tiene una gran oportunidad de desarrollarse ampliamente. Es un método no destructivo que presenta varias ventajas en su aplicación a la inspección de edificios. Permite localizar problemas como: humedad, falta de aislamiento térmico, estructuras ocultas, entre otros. En este trabajo se identificó una configuración en un edificio con las condiciones más críticas de estudio; donde se tomaron imágenes termográficas en diferentes horas del día, para observar la condición de variación de temperatura a las que está sometida la configuración, sean estas condiciones ambientales o debido a instalaciones utilizando una cámara termográfica. Con esta se obtuvieron imágenes en un determinado periodo de tiempo, a partir de la emisividad del material analizado. Se simuló con el software de elementos finitos ANSYS, tomando como punto de partida los datos entregados por la cámara termográfica. Los parámetros que intervienen son: radiación, convección, y conducción. A través de los datos obtenidos, se generó un conjunto de imágenes que servirán como referencia para los posibles defectos que se pueden encontrar dentro de una configuración de materiales, además de generar un procedimiento básico de inspección que facilite la interpretación de los resultados.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto consta de seis capítulos, donde se aborda los principales defectos que se dan en una edificación de una configuración específica, por medio de una simulación de elementos finitos.

El capítulo uno se presenta a la *Termografía como ensayo no destructivo,* explicando de manera general las ventajas, desventajas, aplicaciones en la industria, y el fenómeno físico que lo explica; así también el equipo utilizado para el ensayo no destructivo.

El segundo capítulo corresponde a la *Inspección termográfica en estructuras o edificaciones*, donde se recopila los defectos principales que pueden ser analizados por esta técnica y la selección de la configuración a simular.

El tercer capítulo denominado *Desarrollo de la simulación termográfica*, explica de manera metódica el proceso que se debe llevar a cabo para una correcta simulación. En esta sección se presenta toda la información de importación de la configuración, parámetros, mallado y resultados obtenidos; elaborados mediante el software de elementos finitos ANSYS.

En el capítulo cuarto se presenta el *Análisis de resultados*, consiste en la comparación de imágenes térmicas con imágenes simuladas, las cuales permiten observar de manera clara los diferentes defectos escogidos previamente.

El capítulo cinco denominado como *Consideraciones de un procedimiento general de inspección*, se detalla un formato que permite visualizar de manera sencilla los fallos que se presentan dentro de una configuración definida.

El capítulo seis, *Conclusiones y Recomendaciones*, corrobora la investigación realizada en base a los objetivos propuestos en el trabajo realizado y recomendaciones a ser consideradas al momento de realizar un análisis, simulación e interpretación de resultados.

En los anexos se incluyen, el equipo termográfico utilizado, los métodos de cálculo de la simulación, el formato de análisis y algunos ejemplos realizados.

CAPÍTULO 1.

TERMOGRAFÍA COMO ENSAYO NO DESTRUCTIVO

1.1 INTRODUCCIÓN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Las técnicas utilizadas en los *ensayos no destructivos (END)* permiten el estudio de todo tipo de objetos independientemente de su forma, tamaño, o material sin afectar de manera permanente las propiedades mecánicas, físicas, o químicas.

Estas técnicas son empleadas principalmente para medir y caracterizar los diferentes defectos o anomalías presentes en el material u objeto analizado. Para garantizar la correcta realización de las diferentes técnicas de END es necesario basarse en patrones de calibración y estándares de referencia como son las normas: ASME, ASTM, AWS, ISO. A partir de las cuales se pueda comparar y analizar los resultados obtenidos.

Por otro lado la norma ASNT (American Society for Nondestructive Testing), es la encargada de la capacitación de los mismos, desarrollando diferentes niveles de técnicas a desarrollar, divididos en nivel I, II, III. (Hidalgo García, 2015)

En Ecuador este tipo de capacitaciones son dadas entidades ecuatorianas que emiten certificados nivel I y II.

Las técnicas para END se dividen en dos grupos principales según su aplicación y profundidad del defecto, mostradas a continuación:

Técnicas de Inspección Superficial:

- Inspección visual (VT)
- Líquidos penetrantes (PT)
- Partículas magnéticas (MT)
- Corrientes inducidas (ET)

Técnicas de inspección volumétrica:

- Radiografía (RT)

- Ultrasonido (UT)
- Emisión acústica (AE)

Para el caso del ensayo por termografía infrarroja, a partir de la técnica empleada pueden aplicarse tanto en inspecciones superficiales como en volumétricas. (Hidalgo García, 2015)

1.2 TIPOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

1.2.1 INSPECCIÓN VISUAL (VT)

La técnica de inspección visual (*Visual Testing - VT*) es la más comúnmente empleada en la industria. Como su nombre lo indica, consiste en la inspección visual del objeto de estudio para evaluar la presencia de discontinuidades en la superficie. (Rodríguez González, 2012)

Por lo tanto esta técnica demanda una gran cantidad de información acerca de las características del elemento a ser estudiado, para una correcta y apropiada interpretación, aplicada como inspección preventiva, ya que muestra problemas que pudieran ser de mayor magnitud posteriormente. (AEJB, 2010)

1.2.2 LÍQUIDOS PENETRANTES (PT)

La técnica de ensayos no destructivos mediante líquidos penetrantes (*Liquid Penetrant Testing - PT*), se basa en el fenómeno de capilaridad y consiste en aplicar un líquido de baja viscosidad (líquido penetrante) sobre la superficie a inspeccionar, de esta forma se consigue rellenar las fisuras y discontinuidades presentes en la superficie del material, posteriormente se elimina el excedente de este líquido y se emplea un revelador, por lo general en polvo, de alta absorción que permite identificar los defectos a simple vista o empleando lámparas fluorescentes o de luz negra, dependiendo del método empleado. Se muestran los pasos principales que componen dicha técnica (figura 1-1). (Rodríguez González, 2012)

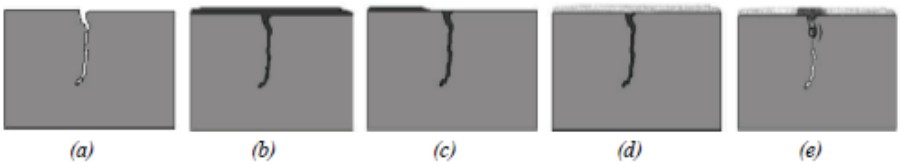


Figura 1-1 Composición de la técnica de END por líquidos penetrantes.
Limpieza previa del material (a), aplicación del líquido penetrante (b), eliminación del exceso del líquido penetrante (c), aplicación del revelador (d) e inspección y evaluación final (e).
Fuente: (AEJB, 2010)

Para este tipo de ensayo si este fuese el caso depende de varios aspectos como son el tipo de material, el revelador, el líquido penetrante, la norma a la cual se rigen, nivel de sensibilidad. (AEJB, 2010)

1.2.3 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MT)

La técnica de ensayos no destructivos mediante partículas magnéticas (*Magnetic Particle Testing - MT*) se basa en el empleo de uno o más campos magnéticos para localizar discontinuidades superficiales y sub superficiales presentes en materiales ferromagnéticos. Para detectar estas discontinuidades (figura1-2), se aplica un campo magnético a la pieza mediante el empleo de un imán permanente o de un electroimán (dependiendo de las características de la instalación). En las zonas del material que contengan algún defecto, las cuales generarán la atracción de partículas magnéticas aplicadas por distorsiones del campo magnético o de los polos, ya sea en forma de polvo sobre la superficie o en suspensión. (Halmshaw, 1989)

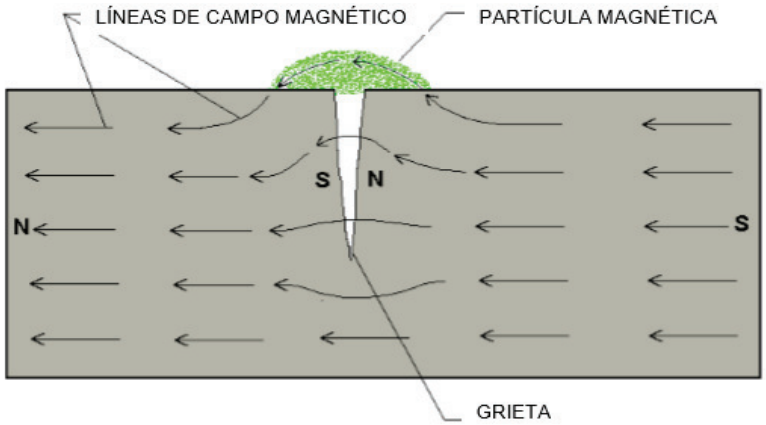


Figura 1-2 Composición de la técnica de END por partículas magnéticas
Fuente: (Fabricación, Dpto. de Ingeniería de materiales y fabricación, 2010)

1.2.4 CORRIENTES INDUCIDAS (ET)

La técnica de ensayos no destructivos mediante corrientes inducidas (*Electromagnetic Testing - ET*) se basa en la inducción electromagnética generada por una bobina de corriente alterna aplicada en un material electro-conductor.

Al acercar la bobina a la pieza, el campo magnético de esta (campo magnético primario) generará un campo magnético de signo contrario (campo magnético secundario) a partir de la corriente eléctrica inducida en la pieza por la bobina. El patrón de flujo de la corriente secundaria (corriente de Eddy) se verá afectado por las discontinuidades presentes en el material, las cuales podrán ser caracterizadas a partir de los cambios en la densidad de la corriente inducida (figura 1-3).

El empleo de esta técnica permite realizar en algunos casos inspecciones de forma automática en elementos de geometría sencilla. Se emplea comúnmente en la inspección de elementos tubulares y puede ser aplicado en inspecciones continuas a altas velocidades. (Udpa & Moore, 2004)

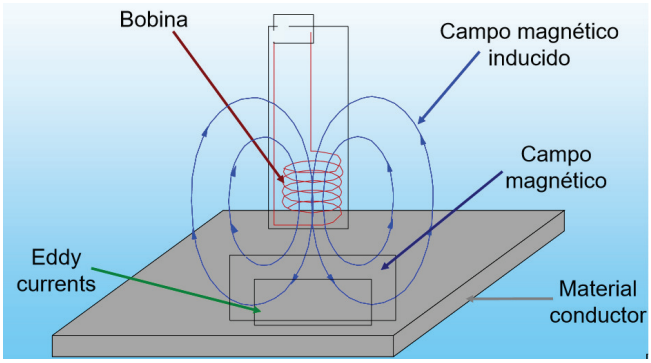


Figura 1-3 ***Composición de la técnica de END por corrientes inducidas***
Fuente: (Fabricación, Dpto. de Ingeniería de materiales y fabricación, 2010)

1.2.5 RADIOGRAFÍA (RT)

La técnica de ensayos no destructivos de inspección volumétrica mediante radiografía (*Radiographic Testing - RT*) consiste en la evaluación de materiales mediante la exposición de estos a rayos X o Gamma. La capacidad de penetración de estas radiaciones permite identificar los defectos y discontinuidades presentes en el interior del material inspeccionado (figura 1-4). Al atravesar la pieza, la radiación electromagnética (rayos X o rayos Gamma) empleada es adsorbida o atenuada. Estos procesos son proporcionales a las características y composición

del material, por lo cual, la información contenida en la parte de la radiación que traspasa el material puede ser registrada permitiendo de esta forma la identificación y localización de los defectos internos presentes en el material. (Bossi, Iddings, & Wheeler, 2002)

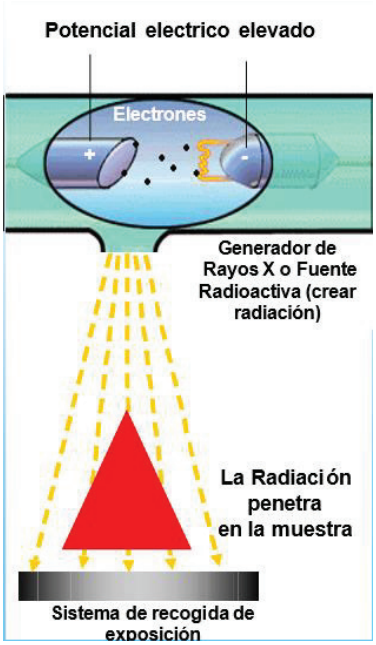


Figura 1-4 ***Composición de la técnica de END por radiografía***
Fuente: (Fabricación, Dpto. de Ingeniería de materiales y fabricación, 2010)

1.2.6 ULTRASONIDO (UT)

La técnica de ensayos no destructivos de inspección volumétrica mediante ultrasonido (*Ultrasonic Testing - UT*) se basa en la impedancia acústica, la cual está en función de la velocidad máxima de propagación del sonido en el material inspeccionado y de la densidad del mismo. Las ondas ultrasónicas se pueden propagar en el material principalmente de forma longitudinal o de forma transversal, aunque también se emplean otros modos de propagación como pueden ser de forma superficial, de barra o de Lamb. Mediante esta técnica se pueden identificar defectos tanto a nivel de superficie como interiores, dependiendo siempre del tipo de palpador y de la frecuencia empleados. El empleo de acoplantes (agua, aceite, grasa, glicerina, etc.) permite disminuir las pérdidas de energía en la transmisión acústica entre el transductor y la pieza a inspeccionar. La viscosidad del acoplante a emplear estará condicionada por la rugosidad superficial del material a inspeccionar. Los ensayos no destructivos mediante ultrasonidos presentan varios

tipos de métodos de aplicación, a partir del tipo de acoplamiento acústico empleado se pueden aplicar el método por contacto (pulso-eco o por transmisión) o el método por inmersión (en tanque, chorro de agua o de rueda). (Kremkau, 2001)

1.2.7 EMISIÓN ACÚSTICA (AE)

La técnica de ensayos no destructivos de inspección volumétrica mediante emisión acústica (*Acoustic Emission Testing - AE*) se fundamenta en la difusión de ondas elásticas transitorias a través del material a inspeccionar generadas a partir de la liberación rápida de energía (carga mecánica, cambio brusco de temperatura o de presión, etc.) a partir del empleo de fuentes externas localizadas con el objetivo de captar la información respecto al movimiento de las dislocaciones internas del material producto de las ondas de tensión generadas. Esta información es captada mediante el empleo de transductores (sensores piezoeléctricos) similares de los palpadores empleados en los ensayos mediante ultrasonidos, pero en este caso funcionan de forma inversa (la emisión acústica captada es transformada en impulsos eléctricos). (Grosse & Ohtsu, 2008)

1.2.8 TERMOGRAFÍA INFRARROJA (IR)

La técnica de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja (*IR*) se basan en la reproducción de imágenes visibles a partir de la luz infrarroja invisible (para el ojo humano) emitida por todos los cuerpos debido a su condición térmica (temperatura superior a 0 K). (Astarita, Cardone, & Carlomagno, 2006) , (Carlomagno & Cardone, 2010)

1.3 TERMOGRAFÍA INFRARROJA (IR)

1.3.1 EVOLUCIÓN Y ORIGEN HISTÓRICO

La termografía infrarroja no es una práctica reciente limitada a las últimas décadas, generalmente se lo entiende de esa manera. Su comienzo se da a inicios del siglo XIX, por los experimentos de William Herschel; quien al regular la temperatura de los distintos colores que eran alejados por un prisma mostrado al sol, manifestó en 1800 la existencia de los rayos infrarrojos.

Herschel los nombró rayos infrarrojos; ya que en sus experimentos realizados con termómetros, reveló que la temperatura se elevaba cuando cambiaba del color violeta al rojo, y lo mismo sucedió durante la representación visible de este color, donde no existía luz. Mientras seguía experimentando con la radiación infrarroja, descubrió que la transferencia es diferente entre materiales. Por ejemplo, el vidrio comparado con el germanio es un mal conductor de radiación infrarroja.

El primer termopar fue presentado por Leopoldo Nobili en 1829, este elemento permite medir la temperatura de la superficie de un elemento o configuración por medio de un sensor de contacto produciendo un efecto termoeléctrico en el mismo.

Melloni, en el año de 1833, presentó la primera termopila; el cual incrementaba la sensibilidad de medición para detectar radiaciones infrarrojas, gracias a un generador termoeléctrico que en secuencia conectaba varios termopares.

Posteriormente en 1840, el hijo de William Herschel, John Herschel; por medio de un evaporígrafo obtuvo la primera imagen visible de la radiación infrarroja. En la actualidad, se conoce como mapa de isoterma. Este se genera por una evaporación deferencial de una lámina fina de aceite que se evapora en las áreas de mayor temperatura del elemento.

Samuel P. Langley, inventa en 1880 el bolómetro, que fue la primera cámara infrarroja que se utilizó como sensor térmico. Este dispositivo es un detector térmico que permite medir la radiación electromagnética cuando es calentado, producido por la variación de la conductividad eléctrica.

La Primera y Segunda Guerra mundial, dieron cabida a que la tecnología infrarroja y térmica se desarrolle de manera rápida a inicios del siglo XX. Siendo los militares, los primeros en ver utilidad a estas tecnologías, ya que podían observar objetivos en la oscuridad. Las progresivas pruebas generaron varias patentes, y con ello mejoras significativas en los dispositivos conocidos. Un claro avance se dio cuando los Bolómetros o detectores térmicos son enfriados, se mejoraba el rendimiento y fue el principio transcendental para la creación de la primera cámara termográfica. En 1965, una compañía sueca da a conocer la primera cámara infrarroja comercial al mercado, conocida como radiómetro (figura 1-5).

Figura 1-5 Radiómetro termográfico de infrarrojos.
Fuente: (Guerrero Mena, 2013)

Por la acogida de este instrumento, salen entre 1960 y 1970, los primeros distribuidores comerciales, con la ayuda de convenios de ensayos no destructivos consolidaron y extendieron esta técnica.

En 1980 se creó la primera cámara FPA (*Focal Plane Array*). Este tipo de cámaras disminuían el nivel de ruido en las imágenes, reducían tiempo y tenían un vínculo directo de manera digital.

Para finalizar, en la década de 1980, aparecieron los microbolómetros. Los cuales eran dispositivos portables y móviles, que permitían a la cámara eliminar la dependencia de enfriar los sensores en cada medición que se realizaba. (Guerrero Mena, 2013)

1.3.2 CONCEPTOS BÁSICOS RELACIONADOS

1.3.2.1 Los ensayos no destructivos y la termografía

Las principales preocupaciones que afectan a los ingenieros en la actualidad son principalmente: la durabilidad y las fallas en toda área sea esta de diseño, estructural, elección. Se ha visto necesario que los ingenieros ocupen diferentes herramientas técnicas, normas y procesos que ayuden a cumplir con los requerimientos establecidos en las diferentes áreas; mejorando la efectividad y los costos relacionados.

Los ensayos no destructivos (END) son una forma más útil de explorar, ya que son un conjunto de técnicas que pueden ser examinadas sin afectar al elemento analizado a futuro, con ayuda de distintas tecnologías.

La termografía, es una técnica no invasiva a nivel superficial, es decir que no es necesario el contacto directo con el elemento que se va a analizar; y su aplicación no se compromete a nivel estructural. En conclusión la termografía infrarroja (TIR) es una técnica segura, rápida y portátil.

1.3.2.2 Calor y temperatura

Se puede definir calor, como un tipo de energía que se transfiere o no de un elemento a otro, dando como resultado una variación de temperaturas.

Todos los cuerpos poseen energía medible, sin importar la cantidad que este tenga. La temperatura es la unidad de medida más usada para realizar mediciones de energía térmica en un material en específico. Es decir que la temperatura es una medida de la energía térmica, y está en función de la velocidad de las partículas en un elemento o material definido.

Las escalas más utilizadas para medir temperatura son: Celsius, Fahrenheit y Kelvin; siendo la escala Kelvin conocida como: “escala absoluta”, utilizada con mayor frecuencia en la rama de la Física. En este caso por la plataforma utilizada en el estudio del ensayo se empleará la escala de temperatura Celsius.

1.3.2.3 Trasmisión de calor

Antes de cuantificar el calor en un determinado material, se procura definir y comprender la transferencia de calor de un cuerpo a otro. Por tanto, el intercambio de energía entre diferentes cuerpos o entre distintos elementos del mismo con otras temperaturas es denominado transferencia de calor, es decir el cuerpo de menor temperatura recibe calor del cuerpo de mayor temperatura; el proceso es semejante cuando existen varios cuerpos a temperaturas diferentes.

Los tres métodos de la transferencia de calor son: radiación, conducción y convección; que pueden darse de forma simultanea o cualquier de ellos predominar a los demás. Se presenta las características de cada uno de los métodos mencionados anteriormente:

- La “conducción”, se produce mediante el contacto físico y la transferencia de calor es entre objetos sólido.
- La “convección”, se produce con el movimiento de calor de una parte del fluido a otra siendo la transferencia de calor entre líquidos o gases.
- La “radiación”, se produce cuando los cuerpos emiten energía en forma de ondas electromagnéticas, la diferencia con los otros dos, es que los elementos o los cuerpos, no es necesario que estén en contacto para que se ocasione transferencia de calor. (Guerrero Mena, 2013)

1.3.2.4 Radiación térmica

Se define a la radiación como la transferencia de energía continua que los cuerpos o sustancias transfieren en forma de ondas electromagnéticas a la velocidad de la luz, compuestas por el movimiento de las moléculas y átomos que forman la materia.

Por lo tanto la “*radiación térmica*”, se realiza por medio de la energía interna de la sustancia o materia, por el movimiento térmico de las moléculas y átomos que forman a materia. Se dice que la radiación está en equilibrio cuando un cuerpo emisor absorbe energía del exterior compensando esta pérdida de energía; de no hacerlo, se produce un enfriamiento.

Las ondas electromagnéticas tienen una extensa gama de longitudes de onda, que a su vez se dividen en distintas regiones espectrales, tales como: las ondas de radio, las radiaciones infrarrojas, la luz visible, la luz ultravioleta, los rayos X, y los rayos gamma, (figura 1-6). La distribución del espectro de radiación térmica depende del cuerpo emisor; este abarca desde las ondas de radio, considerada la región menos energética hasta la radiación gamma, que es la región más energética. (Guerrero Mena, 2013)

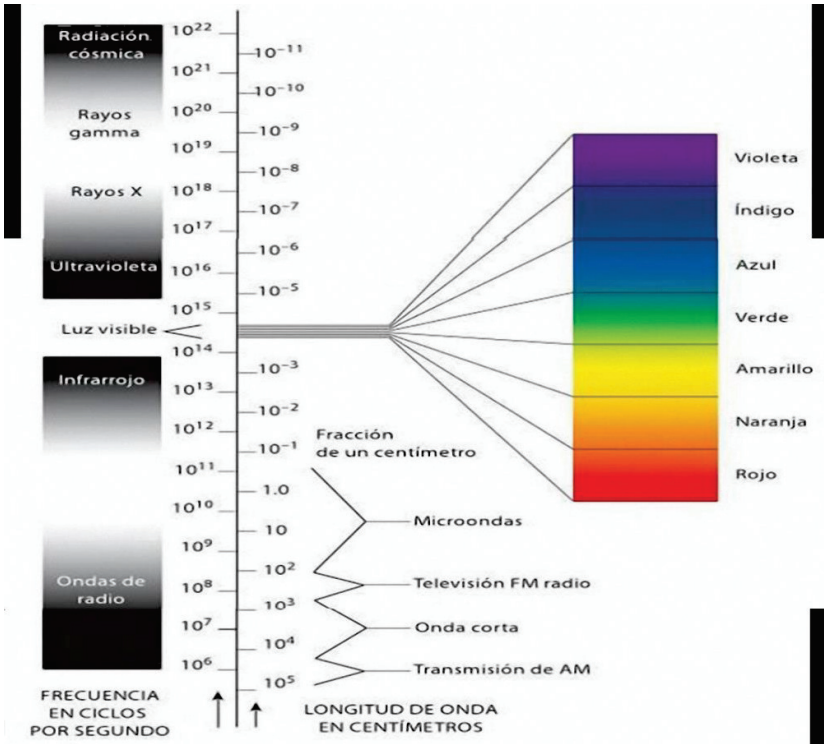


Figura 1-6 Espectro electromagnético.
Fuente: (Peña, 2004)

Las leyes que rigen a la luz visible como: la refracción, la reflexión, y la propagación rectilínea en medios homogéneos; se cumple de la misma manera para la radiación térmica.

1.3.2.5 Radiación infrarroja

Un tipo de radiación térmica es la radiación infrarroja no visible al ojo humano, por su rango de longitud de onda. Sir Frederick William Herschel, los llamó “rayos caloríficos” y posteriormente infrarrojos debido a que están bajo el nivel de energía del rojo. (figura 1-6).

La temperatura de los cuerpos está relacionada directamente con la cantidad de energía que estos irradian, es decir, más caliente equivale a más energía irradiada; por lo tanto un cuerpo es considerado “caliente”, cuando este absorbe menos energía que la que emite, fue así como se identificó el principio base de la radiación infrarroja originalmente.

La cámara termográfica, es el instrumento por cual se ha dado a conocer su aplicabilidad en diferentes ramas; debido a que su uso se lo realiza sin interactuar de manera directa con el cuerpo o sustancia. (Guerrero Mena, 2013)

1.3.2.6 Radiación del cuerpo negro

Parte de la radiación que emiten los cuerpos se absorbe, una parte se refleja y otra se transmite; esto es en lo que se basa la ecuación del balance térmico.

Dicho concepto genera la siguiente clasificación de los cuerpos o materia:

- El “cuerpo negro”, es aquel que absorbe toda la radiación incidente en él, proveniente de cualquier longitud de onda
- El “cuerpo blanco” o especular, el cual refleja toda la radiación y
- El “cuerpo transparente” que permite el paso de las ondas electromagnéticas cualquiera que sea su longitud de onda.

La radiación del cuerpo negro o “radiador perfecto”, es aquel que absorbe la misma cantidad de energía radiante que emite, por lo que es considerado que está en estado de equilibrio térmico, es decir, este fenómeno se da cuando la relación entre el cuerpo y el medio ambiente que los rodea es débil. (López Rodríguez, 2010).

Se toma como modelo de referencia para el cálculo y medición de otras características, la definición del cuerpo negro considerado como ideal; donde se deriva el concepto de emisividad.

1.3.2.7 Emisividad

Emisividad, se define como la capacidad de irradiar energía, característica propia de los cuerpos negros en cuanto a la eficiencia de radiación electromagnética.

Esta propiedad, que toma valores referenciales entre 0 y 1; siendo el material con mayor emisividad el que posea un valor cercano a 1. Referencia al porcentaje de energía que emite un cuerpo que depende de la energía máxima que irradia el mismo a igual temperatura. De la misma manera la emisividad actúa en función de otras variables, que incluyen el color y la rugosidad; que se ven afectadas en la medición de las radiaciones térmicas emitidas por un material específico y modificado según la temperatura y longitud de onda. (Guerrero Mena, 2013)

A continuación se presenta una tabla con diferentes materiales y su respectiva emisividad, que se utilizan comúnmente en el área de construcción y diseño:

Tabla 1-1 Emisividad de materiales

MATERIAL	*EMISIVIDAD*
Acero chapa laminado	0,56
Acero chapa niquelado	0,11
Acero inox. altamente oxidado	0,67 - 0,76
Acero inox. establemente oxidado	0,67 - 0,90
Acero inox. ligeramente oxidado	0,33 - 0,40
Acero inox. limpio	0,22 - 0,35
Acero inox. pulido	0,17 - 0,30
Acero muy oxidado	0,88
Acero recién laminado	0,24
Acero rojo oxidado	0,69
Acero suave	0,12
Acero superficie rugosa	0,96
Acero, galvanizado	0,28
Agua	0,96
Aluminio	0,02 - 0,06
Aluminio anodizado	0,76 - 0,82
Arena csi	0,85 - 0,90
Asbestos	0,04
Cobre oxidado	0,50 - 0,80
Cobre pulido	0,03 - 0,04
Concreto	0,88 - 0,93
Cromo	0,05 - 0,14
Fibra de vidrio / celulosa	0,80 - 0,90
Hielo	0,95 - 0,98
Hierro ligeramente oxidado	0,61
Hierro muy oxidado	0,85
Hoja de asbesto	0,93 - 0,96
Hormigón	0,93
Ladrillo	0,93 -0,96
Ladrillo aislante de caolín	0,53 -0,70
Ladrillo de alúmina	0,33 - 0,40
Ladrillo de Mn2O	0,31 - 0,45
Madera	0,82 - 0,92
Mármol	0,93
Molibdeno áspero	0,25 - 0,42
Molibdeno oxidado	0,80 - 0,82
Molibdeno pulido	0,06 - 0,26
Nieve	0,82 - 0,90
Níquel oxidado	0,40 - 0,57
Níquel pulido	0,09 - 0,17
Oro	0,01 - 0,06
Oxido de aluminio	0,69

Tabla 1-1 Emisividad de materiales (continuación)

Papel	0,92
Papel aluminio	0,03 - 0,05
Papel blanco	0,92 – 0,97
Pavimento de asfalto	0,85 – 0,93
Piedra caliza	0,36 - 0,90
Piel	0,95
Pintura blanca acrílico	0,9
Pintura blanca ZnO	0,92
Pintura negra	0,98
Pintura: esmalte blanco	0,91
Pintura: esmalte negro	0,91
Pintura: laca blanca	0,8
Pintura: laca negra	0,8
Pirocerámica	0,57 - 0,78
Plata	0,02
Platino	0,10 - 0,18
Pyrex	0,8
Rocas	0,88 - 0,95
Tantalio	0,11 - 0,28
Teflón	0,85 - 0,92
Tejas	0,93
Tela	0,75 - 0,90
Tierra vegetal	0,93 - 0,96
Tungsteno	0,10 - 0,29
Vegetación	0,92 -0,96
Vidrio ventana	0,90 - 0,95
Yeso o cartón de yeso	0,90 - 0,92

Fuente: (RIMA international, 2002) , (es.scribd.com, 2011), (Incropera & DeWitt, 1999)

1.3.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL ENSAYO DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Entre las desventajas se tiene:

- Problemas con la presencia de valores diferentes de emisividad en el material.
- Limitaciones en la profundidad de los defectos a detectar.
- Limitaciones y perturbaciones a partir de las pérdidas de calor ocasionadas por los diferentes métodos de transferencia de calor (convección, radiación y conducción).

- Limitaciones en las medidas a partir de la distancia entre el sensor IR y la superficie a evaluar debido a la absorción de la radiación infrarroja por la atmósfera en grandes distancias.

Entre las ventajas, comparándolas con los demás END:

- Permiten la identificación de discontinuidades superficiales y sub superficiales, obteniendo datos relativamente fáciles de interpretar de forma rápida y sencilla, a diferencia de los ensayos mediante inspección visual (VT).
- La calidad de las inspecciones no siempre estará condicionada por la experiencia del operario, ya que, muchos de los algoritmos de tratamiento de secuencias de imágenes térmicas permiten la identificación de los defectos de forma automática.
- Las técnicas IR no requieren de una limpieza previa o estar en contacto directo con el elemento a estudiar, dando solución de esta manera a algunas de las inconvenientes que se detectan en los ensayos mediante líquidos penetrantes (PT), en los ensayos mediante corrientes inducidas (ET) y en los ensayos mediante partículas magnéticas (MT).
- Permiten analizar todo tipo de materiales, a diferencia de los ensayos MT, limitados a materiales ferromagnéticos.
- Si se realiza un análisis en base a los ensayos mediante radiografía (RT), las técnicas infrarrojas ofrecen una ventaja significativa, puesto que carecen de exposición a radiaciones ionizantes, de modo que se aporta mayor seguridad a los operarios e inspectores durante los ensayos, así como también de no requerir de zonas aisladas o controladas para su uso.
- Las técnicas de ensayos no destructivos mediante ultrasonido (UT) requieren del empleo previo de estándares de referencia (palpadores), y la utilización de diversos equipos y accesorios de alto coste durante los ensayos. Por lo cual, los ensayos (IR) permiten obtener buenos resultados de forma más rápida, sencilla y sin contacto.
- En ensayos de emisión acústica (AE), las técnicas infrarrojas permiten realizar análisis cualitativos y cuantitativos sin necesidad de emplear

técnicas complementarias, como sucede en los ensayos mediante AE. (Hidalgo, J.R.A., López, & Madruga, 2013)

1.3.4 PROCEDIMIENTO DE UN ENSAYO TERMOGRÁFICO

Los avances que ha tenido la termografía TIR, han ido evolucionando en un periodo relativamente corto, por lo que en este aspecto se deberá seguir un orden lógico de planteamiento acerca de este tipo de ensayo, incluyendo la preparación y ejecución del mismo.

Como cita Cely Guerrero en su estudio *"Evaluación de la aplicabilidad de la técnica de la termografía infrarroja al reconocimiento del estado de elementos de hormigón",* (2013)*;* en el código termográfico de aplicación para la edificación: UKTA (Asociación de termografía del Reino Unido), presenta un procedimiento general para llevar a cabo un estudio termográfico. (UKTA, 2009) citado por (Guerrero Mena, 2013)

- Identificación de un problema
- Clasificación del problema
- Selección técnica de termografía TIR a utilizar para diagnosticas el problema
- Desarrollar el método adecuado
- Acordar los entregables
- Equipo y preparación
- Salud y seguridad
- Selección de tiempo adecuado para la inspección en el lugar (condiciones climáticas)
- Realización del ensayo
- Análisis de los resultados
- Elaboración del informe

Al iniciar un ensayo termográfico, se necesita entender los principios básicos que lo gobiernan, como son las propiedades térmicas de los cuerpos y el análisis del espectro de luz, produciendo variaciones de temperatura entre los cuerpos analizados, haciéndose evidentes para la cámara termográfica. Para que sucedan estos cambios de temperatura es indispensable, que exista una transferencia de

calor a través del cuerpo o cuerpos en cuestión. Para exposiciones externas el sol cumple con dicha función, en cambio de exposiciones internas donde se necesita de un agente que provoque esta transferencia. (Guerrero Mena, 2013)

1.3.5 CLASIFICACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA TIR

Cuando la temperatura supera el cero absoluto, se conoce que el cuerpo emite energía. La misma que se propaga como ondas electromagnéticas, y a temperatura del ambiente se convierte en radiación infrarroja.

Cuando la temperatura es diferente al cero absoluto, los cuerpos emiten y absorben radiación infrarroja, las cuales son medibles por la termografía TIR. Existen dos maneras de medir las ondas infrarrojas de un cuerpo: por medio de la termografía TIR pasiva o TIR activa.

1.3.5.1 TERMOGRAFÍA TIR PASIVA

La termografía TIR pasiva provoca en el cuerpo estudiado un flujo de calor en el que no es necesaria una excitación o calentamiento externo. En la TIR pasiva, los contornos fuera de rango de temperatura revelan un problema posible, se considera como referencia a un punto (Delta - T), por lo que los valores mayores al punto de referencia son considerados posibles problemas en el cuerpo. (Maldague, 2001).

1.3.5.2 TERMOGRAFÍA TIR ACTIVA

La termografía TIR activa provoca un flujo de calor interno que tiene el objetivo de adquirir variaciones de temperaturas significativas, utilizando una fuente externa para traer energía al cuerpo analizado (figura 1-7). Los defectos superficiales y sub superficiales son obtenidos a partir de estas variaciones de temperatura, mostrando un diferencia con el área no afectada que los rodea, debido a la propiedad mecánica denominada como difusión térmica.

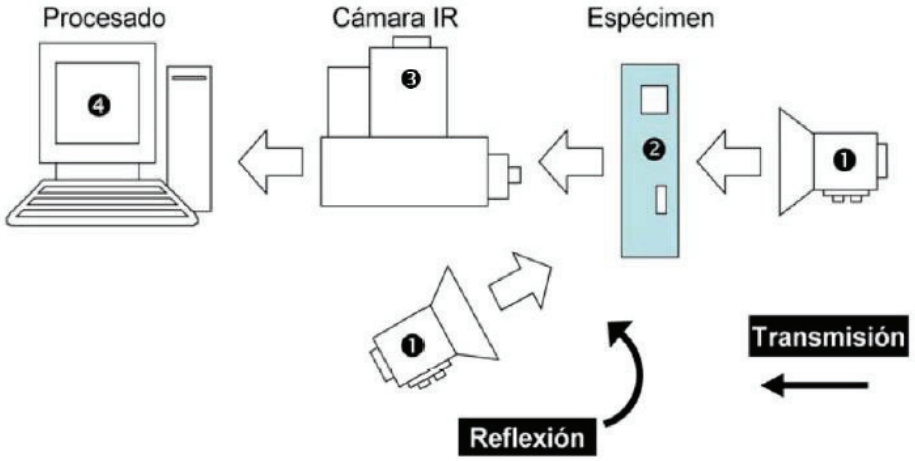


Figura 1-7 Procedimiento de imágenes por TIR activa.
La posición de la fuente de calor (1) con respecto la cámara infrarroja (2) y el cuerpo de estudio es lo que constituye, si la obtención se ocasiona en transmisión o en reflexión. La energía se transmite por conducción al interior del elemento (3). La presencia de un defecto genera una variación de temperatura en las imágenes. Éstas son procesadas, examinadas y recopiladas de forma digital (4)."
Fuente: (Maldague, 2001)

La TIR activa Presenta 4 tipos: (Maldague, 2001).

- **Termografía pulsada (Pulsed Thermography):** consiste en utilizar un calentamiento pulsado, como lo nombre lo indica, corto e intenso sobre el cuerpo estudiado para posteriormente cuantificar la disminución de temperatura. Se debe considerar no llegar a temperaturas muy elevadas y tiempos de exposición prolongados, ya que el cuerpo puede sufrir daños. Por su facilidad de uso, es una de las técnicas más recomendadas de estimulación térmica.
- **Termografía modulada (Lock-in Thermography):** este tipo de TIR calienta de manera sinusoidal al cuerpo estudiado, para producir ondas térmicas en el interior del cuerpo. Para que esto suceda, debe existir una correcta sincronización entre la señal de entrada que alimenta la fuente de calor y la señal de salida proporcionada por la cámara.
- **Termografía de pulso largo (Long – pulse thermography):** con este procedimiento el cuerpo estudiado, está sometido a un continuo calentamiento de baja potencia o intensidad. La importancia de este método está en tabular el proceso de calentamiento, más no el de enfriamiento.
- **Vibrotermografía (Vibrothermography):** su principio se basa en las vibraciones mecánicas inducidas por el cuerpo externamente, el calor es librado por fricción; donde la energía mecánica se transforma en energía

térmica dentro del cuerpo de estudio, por lo que donde se presenta un defecto (grietas, poros, huecos) existe una discontinuidad del material.

Después de haber detallado las técnicas se puede afirmar, que un cuerpo térmicamente activo es aquel que produce su propio flujo de calor, por lo tanto se debe examinar con termografía TIR pasiva. Por otro lado, los cuerpos térmicamente pasivos requieren de una fuente externa para generar un flujo de calor, sea esta de calentamiento o enfriamiento; y necesitan del método TIR activo para ser inspeccionados. (Guerrero Mena, 2013)

1.3.6 DEFECTOS Y DETECTABILIDAD CON TERMOGRAFÍA TIR

Un registro erróneo puede ser provocado por muchos factores en las mediciones con termografía infrarroja (variación de temperatura en objetos estudiados), afectando de esta manera la posibilidad de encontrar los defectos. Se asocian a fuentes como: reflexiones, ángulo o campo de visión, variaciones de emisividad, curvatura de la superficie, problemas del equipo de captura, propiedades intrínsecas del medio ambiente (viento, luz solar, humedad), temperatura cercana a la del medio ambiente o ruido causado por emisiones del entorno.

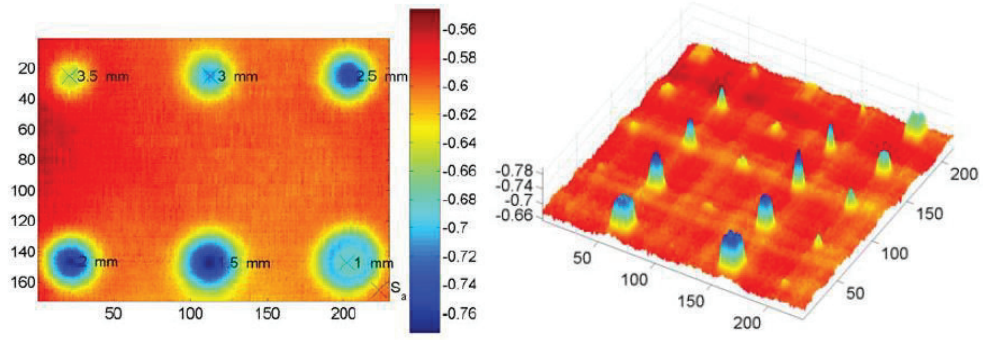
Uno de los problemas más comunes cuando se toman las imágenes IR, es el "ruido", ya que afecta a la resolución y exactitud en la medición termográfica. Si se incrementa la posibilidad para encontrar los defectos, es importante tomar en cuenta superar al ruido equivalente al diferencial entre temperaturas o NEDT (*Noise Equivalent Differential Temperature*); para de esta manera obtener las diferencias térmicas del cuerpo analizado. La atenuación o reducción en las imágenes infrarrojas dependen de la emisividad y la reflexión; cuando una alta emisividad y una baja reflectividad se juntan sobre la superficie del elemento analizado, la presencia de estos se reduce al mínimo. (Guerrero Mena, 2013)

Algunos factores importantes cuando se detecta fallas y defectos dependen de la técnica que empleada. Esto altera directamente a las mediciones finales, y tienen correlación con propiedades físicas y fenómenos:

- El tamaño del defecto
- La naturaleza del defecto

- La profundidad a la que este se encuentra
- El tipo de material que le rodea
- El tiempo que transcurre desde que se produce la excitación hasta su visualización, (aplica al uso de termografía activa).

Para que los defectos sean detectados, siguiendo estas consideraciones, deben ser dos veces mayor a la profundidad que se encuentran, con ello se obtiene una mejor visibilidad y detectabilidad. Es decir que se puede observar y diferenciar de manera clara la profundidad del defecto en relación a otro con las mismas características (figura 1-8 a). Se ha podido ver defectos a profundidades entre 5 y 7 cm, llegando hasta profundidades máximas de 10 cm. Estos valores dependen principalmente de variables como: emisividad, material, densidad, técnica empleada, entre otros. (Guerrero Mena, 2013)



a) b)

Figura 1-8 Imagen infrarroja.
a) Imagen infrarroja que muestra la ubicación de varios defectos de igual dimensiones, colocados a diferentes profundidades, nótese como a medida que aumenta la profundidad la detectabilidad del defecto se hace menor.
b) Imagen IR en 3D, donde se ubican por filas diferentes defectos. La fila 2 y 4 (de izquierda a derecha), son defectos ubicados a igual profundidad pero distintas dimensiones. Nótese como la detectabilidad disminuye a medida que disminuyen los tamaños de los defectos.
Fuente: (Guerrero Mena, 2013)

Los defectos deben estar distanciados de los bordes del cuerpo analizado, evitando de esta manera que disminuya el contraste entre temperaturas, así mismo deben estar expuestos un determinado tiempo para poder hacer visible al mismo. Otra consideración son las dimensiones del defecto (largo y ancho), independientemente de su profundidad (figura 1-8 b). De igual forma la conductividad térmica se ve afectada, por lo que el tamaño del defecto deberá ser aún mayor que dos veces su profundidad, para ser detectado. (Guerrero Mena, 2013)

Finalmente, después de ser obtenidas las imágenes infrarrojas y ser determinados los defectos, por medio de un procesamiento de imágenes se puede mejorar o destacar puntos o secciones donde se necesite un análisis más extensivo, se utilizará en un análisis matemático como es el de Fourier. Además de plataformas de diseño y simulación que permite dar aspectos cualitativos así como cuantitativos.

1.3.7 TRATAMIENTO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS IR

El tratamiento de imágenes IR, mejora la calidad y el contraste de los termogramas considerablemente, y permite un mejor análisis de los defectos encontrados. Dependiendo del defecto analizado, se puede basar el análisis en varios métodos y técnicas, con ello se minimiza el error a corregir; y se interpreta de manera acertada las señales donde está presente el ruido, reflectividad en la superficie del cuerpo, diferencia de emisividad, entre otros.

Para un correcto procesamiento de imágenes IR para termografía activa, se aplica el método en tres etapas: preprocesado, procesado y postprocesado de imágenes IR.

Por otro lado, con la ayuda de software con lenguajes computacionales basados en algoritmos matemáticos, entrega un sin número de posibilidades basados en el procesamiento de imágenes IR, se toma como referencia la tesis doctoral de Daniel González Fernández: “Contribuciones a la técnicas no destructivas para la evaluación y prueba de procesos y materiales basados en radiaciones infrarrojas, 2006*”* citado por (Guerrero Mena, 2013). La misma que presenta una clasificación de las técnicas más utilizadas y de aplicación sencilla para el tratamiento de imágenes.

1.3.7.1 Preprocesado de imágenes IR

Su principal objetivo es disminuir los efectos de la electrónica y la óptica, que son las señales que se captan superficialmente en la temperatura, que se detallan a continuación:

- *Restauración de pixeles defectuosos (bad pixels):* son los que tienen una variación térmica muy contrastada y en relación con sus cercanos y que no poseen ningún beneficio, suelen ser ocasionados por las fuentes de

calentamiento. El arreglo para este defecto de imagen es por medio de un promedio de pixeles, reemplazando el valor de pixel defectuoso por un promedio de los cuatro pixeles que lo rodean (figura 1-9 b).

- *Suavizado del ruido aleatorio:* este tipo de anomalía se corrige por un filtrado de imagen o sucesiones de imágenes. Se lo aplica aumentando la exposición de la imagen en un tiempo determinado y la frecuencia de captura, o usando un promedio de pixeles en forma lineal o gaussiana.
- Corrección de patrones fijos de ruido (FPN): se realiza una imagen al elemento antes de emplear calor sobre él, y a continuación se le retira esa imagen fija; esta corrección ocurre cuando hay una variación entre las respuestas de los sensores o detectores. (figura 1-9 c).

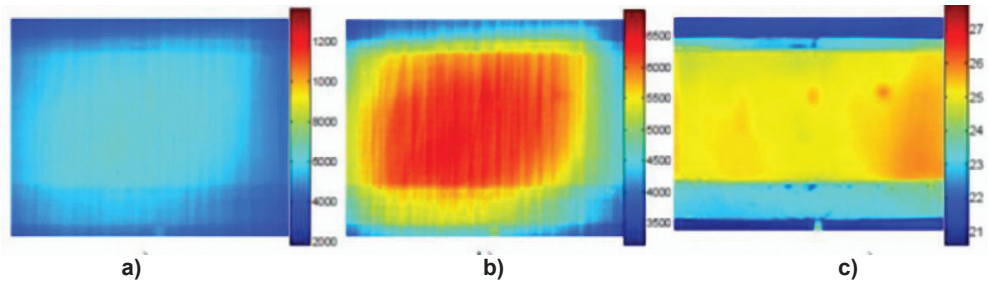


Figura 1-9 Termogramas a t = 348 msg
a) No corregido; b) Tras la restauración de pxeles defectuosos y c) Corrección de encuadre y FPN. La conversión a valores de temperatura también ha sido llevada a cabo. El espécimen bajo inspección es una placa de acero de 2 mm de espesor con tres defectos en la misma área (25 mm^2) pero diferente geometría a la misma profundidad (1 mm).
Fuente: (Guerrero Mena, 2013)

1.3.7.2 Procesado de imágenes IR – Modelado directo

- *Reconstrucción de señales termográficas (TSR):* es una de las técnicas con mayor beneficio para el filtrado de ruido, sobre todo en imágenes que por el calentamiento no uniforme son afectadas. Su principio se fundamenta en el estudio de una zona libre de defectos, donde se predice el comportamiento de a temperatura de un pixel, basándose en la ecuación unidimensional de Fourier. Finalmente entrega como resultado imágenes derivadas temporales, que muestran un contraste térmico de alta calidad y se visualiza de mejor manera los defectos expuestos.
- *Técnicas de contraste térmico: por el procesamiento de señales termográficas, se localiza el contraste de absoluto diferencial (DAC), (*figura1-10*), el cual tiene su fundamento en la variación de temperatura que*

se da entre pixeles de una zona afectada, y otra zona sin defectos. (González Fernández, 2006) citado por (Cely Guerrero, 2013).

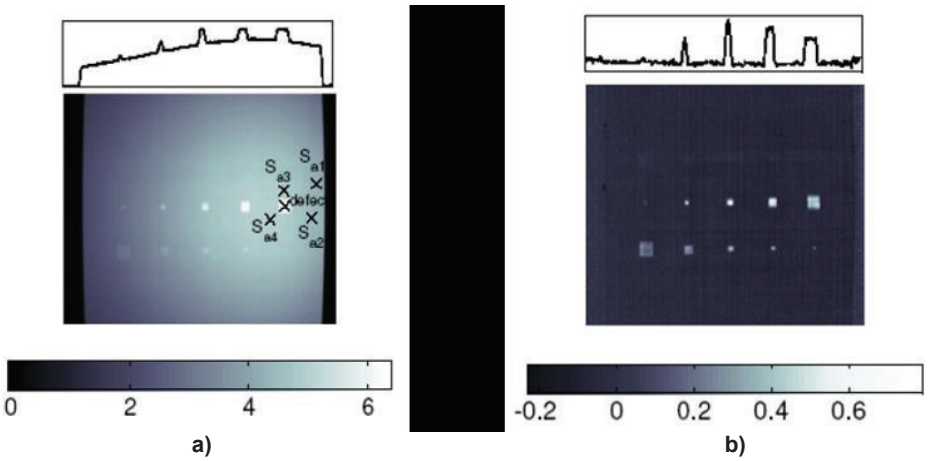


Figura 1-10 Termogramas
a) Termograma después de la sustración de la imagen fría para t = 209 ms. La influencia de la exitación se refleja en la no uniformidad de las zonas de mterial sin defecto.
b) Resultado de la aplicación del contraste diferenciado, DAC, para t = 209 ms.
Fuente: (Guerrero Mena, 2013)

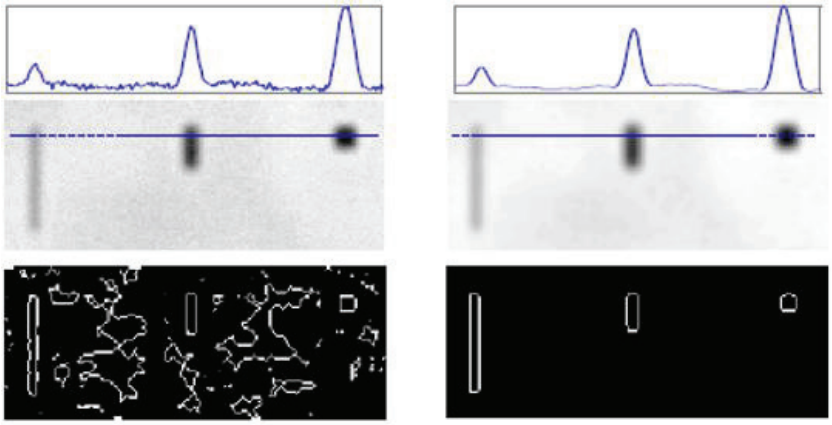
- *Normalización:* esta técnica consiste en realizar un promedio con las imágenes tomadas en secuencia; a continuación se divide este promedio por la media obtenida, estas imágenes son las que presentan mayor diferencia térmica provocando un mayor contraste térmico en las imágenes. (Guerrero Mena, 2013)

1.3.7.3 Postprocesado de imágenes IR - Modelado inverso

El objetivo de este proceso radica no solo en mostrar la presencia de los defectos sino identificarlos con sus tamaños y profundidades, si es posible.

- *Modelos térmicos:* ayuda a tener una idea aproximada sobre la influencia de ciertos parámetros en la detención de defectos sin necesidad de ejecutar una prueba anterior, permitiendo también el conocimiento previo de cada componente (figura 1-11).
- *Inspección visual:* se la da por un operador comúnmente adaptado para la detección de defectos (nivel I, II, y III) reduciendo de esta manera la subjetividad y, en casos puntuales, suprimir de manera completa el factor humano en el proceso de detección. De igual manera se puede analizar la forma y el tamaño de un defecto al inspeccionar estas fasegramas en el

dominio del tiempo para cada pixel, es el promedio que se da en el tiempo de contraste medio, es decir la mitad del tiempo máximo. (figura 1-11 b)



a) b)

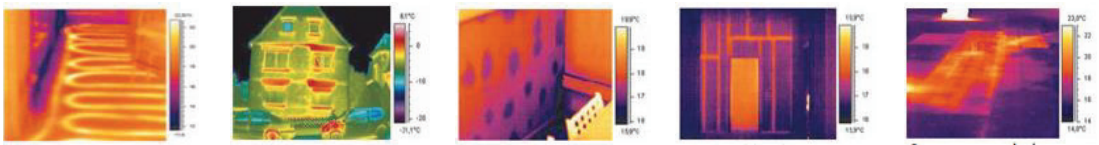
Figura 1-11 resultados de segmentación
a) Fasegrama no filtrado; b) Fasegrama filtrado con un filtro gaussiano de varianza σ = 2.
Fuente: (Gonzáles Fernández, 2006)

- *Regresión empírica: Métodos de inversión de la profundidad:* Como su nombre lo dice son métodos los cuales se dan en el dominio temporal, y se requiere una calibración previa de los datos experimentales con una relación empírica, pueden ser sometidos a un proceso de regresión.

Finalmente, se fundamentará en la última base que se refiere al postprocesado de imagen variando los parámetros para simular una configuración específica por medio de datos experimentales conjugados por la imagen.

1.4 APLICACIONES

El área que abarca los TIR es amplio de los cuales se recopila las siguientes aplicaciones en la industria, como por ejemplo: estado y estudio de válvulas, detección de tuberías subterráneas, nivel de líquido de tanques (y solido), estudio de refractario, estudio de pérdidas térmicas, fugas de vapor, pérdidas de vacio, edificaciones (figura 1-12, 1-13, 1-14).



Calefacción bajo el piso | **Malos aislantes** | **Humedad en muros** | **Inspección de bastidores** | **Goteras en tejados**

Figura 1-12 Termografía en construcciones.
Fuente: (Terres Peña, 2010)

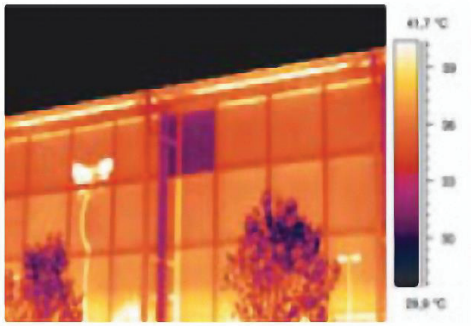


Figura 1-13 Termografía en cubiertas de viviendas.
Fuente: (Terres Peña, 2010)

Sobrecalentamiento de motores | **Bombas sobrecargadas** | **Cojinetes calientes** | **Eje de motor sobrecalentado** | **Motores eléctricos**

Figura 1-14 Detección termográfica en inspecciones mecánicas.
Fuente (Terres Peña, 2010)

Estudios realizados en base a esta técnica como END, tomados de la ASNT.

- Industria de manufactura aeroespacial. - uso de cámaras térmicas para materiales incluidos los alabes, hélices de helicópteros. (Newman, 2006)
- Sistema de inspección de revestimientos activos. - es un nuevo sistema que utiliza la termografía activa con infrarrojos incorporados, el cual entrega rápidamente áreas de defectos de imagen en sistemas de recubrimiento, facilitando su interpretación. (Fuchs & Chase, 2010)
- Edificaciones. – obras de restauración de edificio de valor histórico y artístico. Estas técnicas no destructivas son aplicaciones de cubiertas de madera, con ello se detectan distintas formas de deterioro y fallas incluyendo pérdida de densidad, con el objetivo de evaluar su estado de conservación. (Rodríguez Liñan, Morales Conde, Rubio de Hitta, & Pérez Gálvez, 2011)
- Sistemas estructurales y componentes aeroespaciales aplicados en calibraciones de General Electric. - por medio de sistemas robóticos IR que transmiten un sistema de flash en diferentes tipos de composiciones de materiales. (Ringermacher, Howard, & Knigth, 2008)

- Lock in para variedad de aplicaciones. - describe estaciones de ensayos descritos donde se evalúa defectos, esfuerzos, y tiempos de vida útil de materiales. (Rotolante & McCabe, 2009)
- Frenos de aeronaves de composición de carbono. - análisis donde se segmenta, y clasifica las regiones de carbono, denominando los defectos encontrados. (Anish & Tsuchin, 2012)

Estudios realizados por Dr. Daniel González Fernández.

- Desarrollo de prototipo para la detección de suelos contaminados
- Proyecto SOTEPAC **S**ensor de fibra **Ó**ptica multipunto para el motorizado de altas **T**emperaturas en procesos de **P**roducción y barras de **A**cero en máquinas de colada **C**ontinua. - ensayo realizado en producción continua de colado de barras de acero, optimizando el proceso de producción. (Gonzáles Fernández, 2006)
- Proyecto ECOPLEI **E**studio de viabilidad para monitorizar rl proceso de enfriamiento del **C**olado de **P**lomo en contenedores de combustible nuclear a través de técnicas de **E**spectroscopia **I**nfrarroja.- monitorear y demostrar el proceso de enfriamiento del plomo, mientras se fabrican contenedores utilizados para combustible nuclear por medio de termografía infrarroja. (Gonzáles Fernández, 2006)
- PROYECTO EIKA. - automatización en el proceso de cocinas vitrocerámicas en cuanto a la medición de temperatura. (Gonzáles Fernández, 2006)

Estudios realizados en cuanto a edificaciones y análisis estructurales:

- Detección de daños en concreto estructural. – basado en el estudio de la transferencia de calor en un medio de conducción de una geometría específica, presentando los principales defectos mecánicos, usando un método de elementos finitos. (Shih, y otros, 2000)
- Inspección de compuestos en estructuras. - defectos internos e irregularidades manufacturados por fibra de carbón con un refuerzo polimérico en láminas. (Boritu, Anghel, Constantin, Gavan, & Pascu, 2011)

- Estructuras en ingeniería civil. - estudio en estructuras de concreto reforzado y su uso en cuanto a la termografía activa, para caracterizaciones para caracterización de defectos. (Milovanovi´c & Banjad, 2008)
- Paneles metálicos tipo sándwich. - utilizados en la industria aeronáutica, estudio realizado en el proceso de manufactura, para su estudio posterior en cuanto a las uniones y eficiencia del mismo. (Taylor & Dupont, 1999)
- Detección en escala de laminado en acero. - por medio del proceso de conformado con un análisis de temperatura durante el rolado. (Maldague, 2001)

Aplicaciones que se han dado por medio de TIR:

- Deformación y fractura del papel. - analizado desde un punto de vista mecánico durante un estudio del espesor en función de la fractura del mismo. (Yamauchi, 2012)
- Aplicaciones de materiales en ciencia y la ingeniería. - incluyen análisis de cualidad de tuberías PEHD; TIR en técnicas híbridas en materiales termoplásticos; identificación de defectos en la capa de adherencia pulverización térmica; estudio de proceso dinámico por arco laser; Monitoreo y control de soldadura por fricción (FSW). (Constantin Murariu, y otros, 2012)
- Interfaz de tintas en superficies deslizantes. - por medio de fricción de materiales por medio de la distribución de las partículas metálicas que se producen en los frenos de disco utilizados. (Cucurullo, Spingi, D´Agostino, Di giuda, & Senatore, 2012)
- Propiedades termo físicas en el estudio en medicina y materiales avanzados.- estudio en tecnología médica y biotecnología estudiando la composición de los materiales utilizados en materiales anisotrópicos y materiales compuestos. (Panas, 2012)
- Aplicaciones en estudios biológicos. - estudio realizado en materia orgánica como animales e inorgánica para ver el comportamiento de cuerpos en base a la variación de temperatura. (Yahav & Giloh, 2012)
- Medicina veterinaria. - observar animales vivos en una plataforma de imagen utilizando mapas térmicos en diferentes especies (caballo, cerdo, y vaca). (Stelleta, Gianesella, Vencato, Fiore, & Morgante, 2012)

- Actividad deportiva. - análisis realizado en diferentes estilos de nado, viendo su transferencia de calor antes y después de la misma en diferentes partes del cuerpo. (Arfaoui, Polodori, Taiar, & Popa, 2012)
- Estudio de comportamiento en edificaciones higrotérmicas. - estudio realizado en superficies secas y húmedas en varios espacios de un hogar, para determinar la temperatura de confort en base a niveles establecidos. (Barreira, de Freitas, Delgado, & Ramos, 2012)

1.5 EQUIPOS UTILIZADOS

La TIR generalmente se la realiza por medio del uso de cámaras térmicas que exigen al usuario, evaluar los diferentes tipos de transferencia de calor (convección, radiación, y conducción). La termografía no es solo la obtención de una imagen con una cámara térmica / infrarroja específica. En otras palabras, la generación de esta imagen es considerada como el ensayo térmico, ya que la imagen se evalúa por medio de parámetros establecidos en las normas que lo rigen.

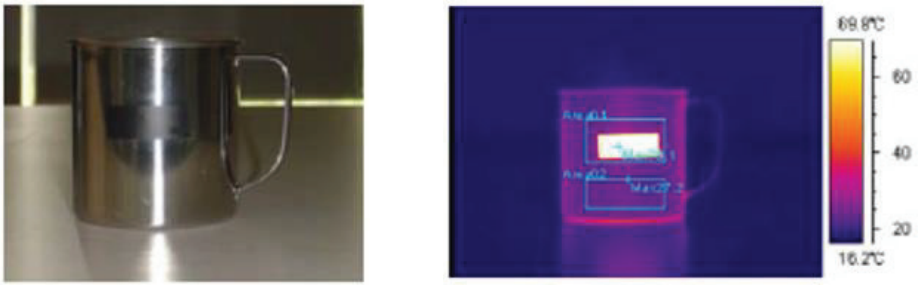
1.5.1 CÁMARAS TERMOGRÁFICAS

La tecnología Uncooled Focal Plane Arraydetector (UFPA), ha desarrollado cámaras termográficas, de una matriz de dos dimensiones (320x240 píxeles), y formada por detectores conocidos como micro bolómetros.

Sobre el detector los infrarrojos incurren como onda electromagnética (Figura 1-6), la absorción de la energía de radiación aumenta la temperatura del detector, la resistencia del detector se ve afectada, y posteriormente este cambio de resistencia crea la señal eléctrica.

Generalmente funcionan en la banda de infrarrojos medios, detectando la radiación infrarroja invisible que es emitida por los cuerpos transformando esta emisividad en una imagen dentro del rango en que sea visible para el ojo humano, puede ser en escala de colores (arcoíris, o rojos) o escala de grises, influyendo en ella también el objeto, tipo de material y el color.

Las cámaras termográficas generan un valor de temperatura para cada punto, sin tener en cuenta que, para una misma temperatura, un material puede irradiar energía infrarroja con diferentes intensidades (figura 1-15). (Terres Peña, 2010)



Taza metálica con cinta adhesiva Taza vista con imagen termográfica

Figura 1-15 Comparación de emisión de energía infrarroja en una taza con una cinta adhesiva
Fuente: (Terres Peña, 2010)

La cámara termográfica se basa en una escala determinada por la misma; donde la señal infrarroja es la señal de entrada necesaria para generar un espectro de colores que son representados por el espectro de luz.

1.5.2 PARTES DE UNA CÁMARA TERMOGRÁFICA

Una cámara termográfica consta de: lentes, filtro, detector o microbolómetro, circuito de procesado de la imagen, interfaz de usuario (pantalla, salida de video, memoria, etc.) (figura 1-16). (Terres Peña, 2010)

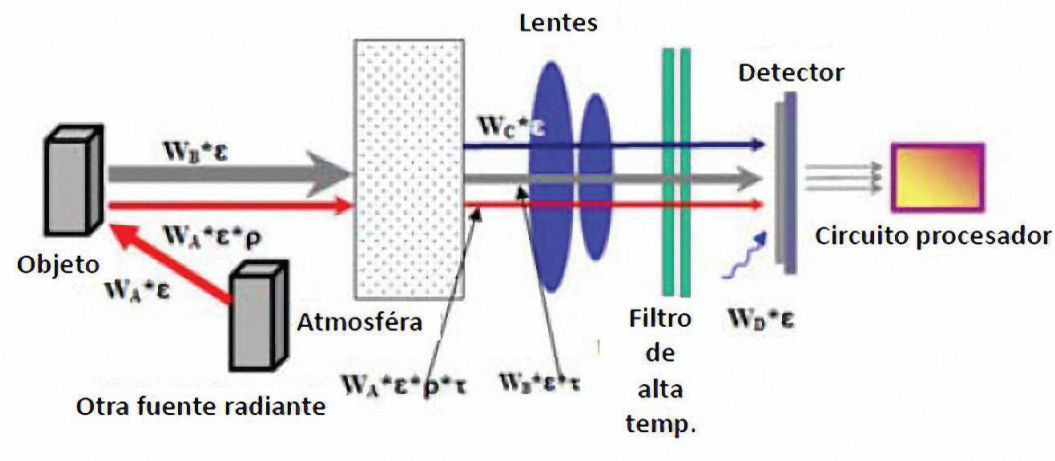


Figura 1-16 Elementos constitutivos de una cámara termográfica.
Fuente (Terres Peña, 2010)

Una particularidad que se debe tomar en cuenta al momento de adquirir este tipo de instrumento es la resolución espacial, ya que esta característica define la distancia máxima hasta donde se puede observar los elementos.

CAPÍTULO 2.

INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA EN ESTRUCTURAS O EDIFICACIONES

2.1 PRINCIPALES DEFECTOS EN EDIFICACIONES

Las fallas más comunes que se presentan en el área de construcción son: los asentamientos en suelos, agrietamientos en losas y muros, desprendimiento de pintura en acabados, así como filtraciones de humedad, y que a menudo se pasan por alto. Por lo que estos defectos y fallas no reciben la atención necesaria, y no se les da importancia; sin saber que a futuro puedan ocasionar grandes molestias.

Las principales causas externas son:

- Fractura de las conducciones y vigas, tanto estáticas como dinámicas, por sobrecargas excesivas.
- Ruptura de tuberías por asentamientos propios o provocados por otras edificaciones cercanas.
- Incorrecta manipulación, rotura y perforación de tuberías de abastecimiento, gas, electricidad; debido a excavaciones.
- Daños a las tuberías por agresividad del terreno, corrientes vagabundas, penetración de raíces, externamente.
- Desgaste en el interior de los conductos por ácidos vertidos, corrosión (formación del sulfuro de hidrogeno en zonas no ventiladas o zonas de decantación de materia orgánica)
- Deterioros por acometidas defectuosas
- Vertidos de residuos sólidos que obstruyen la conducción
- Visualizar las pérdidas de energía, mediante panel de control automatizado
- Aislamiento defectuoso
- Presencia de fugas de aire que no han sido detectadas
- Humedad en el interior y exterior de la estructura, así como también en el aislamiento en tejados y muros.
- Áreas mal aisladas y moho.

- Puentes térmicos
- Filtraciones de agua en tejados planos
- Roturas en tuberías de agua caliente
- Fallos de construcción
- Averías y fallos en el tendido eléctrico y en la calefacción central.

2.2 INSPECCIÓN TÉRMICA DE ALTAS TEMPERATURAS EN ESTRUCTURAS INDUSTRIALES

Se realizan inspecciones en estructuras para focalizar elementos internos; un ejemplo son los intercambiadores de calor en almacenes o galpones; que están en contacto con el medio externo, mostrando la distribución de calor generada por la unión con los elementos, esto depende de la circulación del aire caliente y de la geometría que se tiene por parte de ellos. (Maldague, 2001)

2.3 TERMOGRAFÍA PARA EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

Con una cámara termográfica, se puede mostrar inconvenientes con antelación, de manera que se pueden fundamentar y corregir antes de que empeoren y su reparación implique un costo elevado. Debido a que es una fuente potente y no invasiva de diagnóstico y supervisión es utilizado en edificaciones, siendo la tecnología termográfica, uno de los instrumentos de diagnóstico más valiosos para la inspección de edificios.

Con la ayuda de las cámaras termográficas, se puede localizar e identificar fallos que no se pueden observar a simple vista. Por medio de esta práctica se pueden obtener datos de temperatura precisos que proporciona al usuario información importante sobre sobre condiciones de aislamiento, humedad, fallos eléctricos, así como condiciones en los sistemas de ventilación. Lo importante del uso de la cámara termográfica es la versatilidad de sus aplicaciones y las innovadoras formas de aplicar la tecnología. (FLIR Systems, 2011)

2.3.1 DEFECTOS DE AISLAMIENTOS Y FUGAS DE AIRE

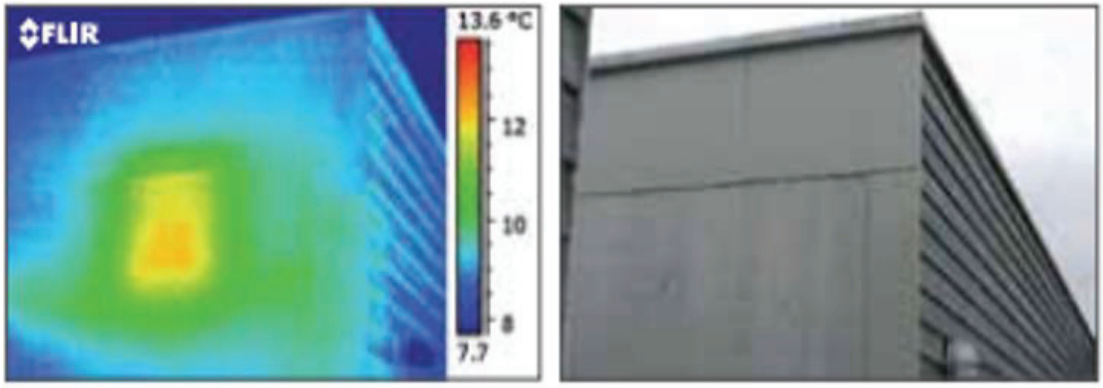


Figura 2-1 Aislamiento en una edificación tipo sándwich.
Fuente: (FLIR Systems, 2011)

La figura 2-1 muestra una construcción tipo sándwich: hormigón – aislamiento – hormigón donde se puede apreciar la falta de aislamiento en un determina sección, lo que ayuda al usuario a determinar la variación de aislamiento que no se observan de manera visual.

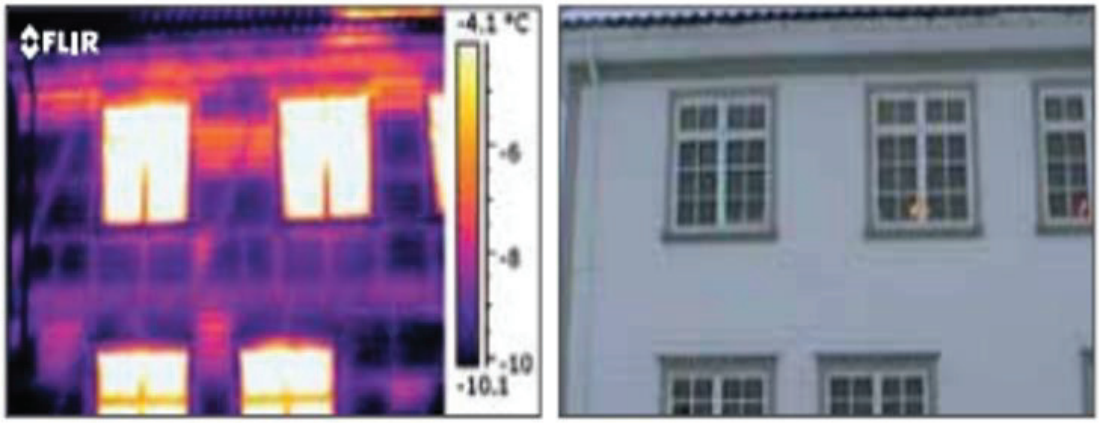


Figura 2-2 Falta de aislamiento en estructura de construcción.
Fuente: (FLIR Systems, 2011)

Se puede apreciar en la figura 2-2, la falta de aislamiento en secciones corroborado por los colores más cálidos.

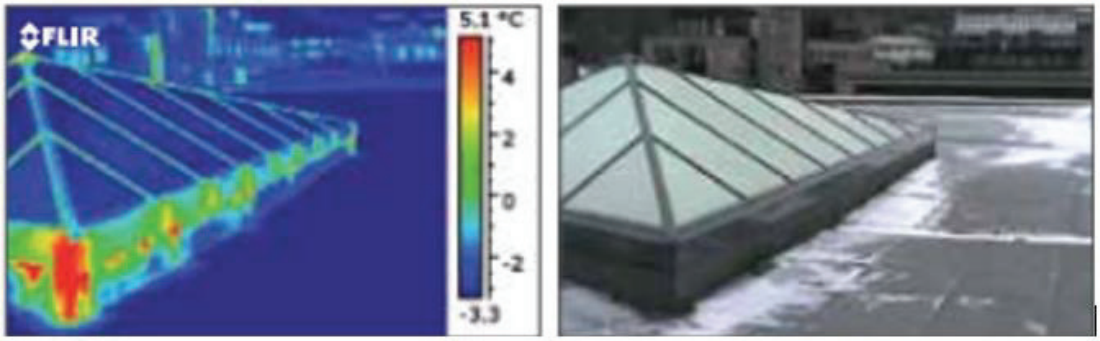


Figura 2-3 Techo con aislamiento.
Fuente: (FLIR Systems, 2011)

La figura 2-3 muestra un techo acristalado sobre un atrio. No es prueba de aire, sino de agua. Debido a esto, el aire caliente se escapa por la presión excesiva.

La pérdida de energía en uniones de elementos, se experimenta en los almacenes con muros pre fabricados y tajado bien aislado.

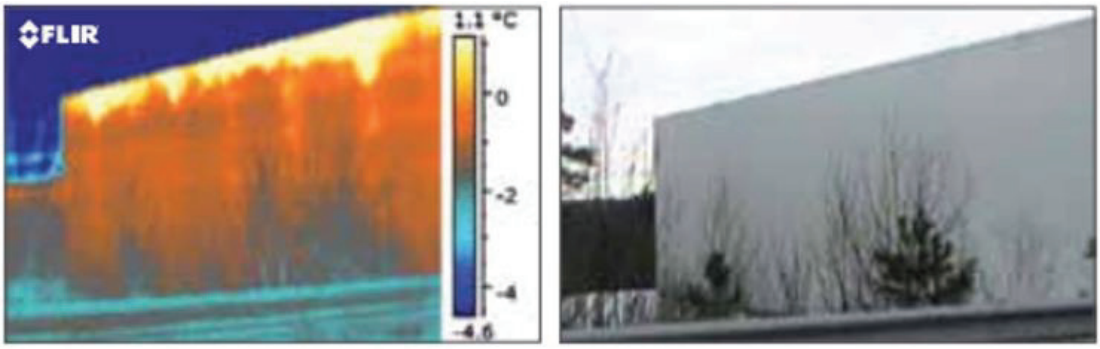


Figura 2-4 Almacén con aislamiento en la parte superior.
Fuente: (FLIR Systems, 2011)

Se observa en la pared (figura 2-4), falta de aislamiento o pérdida de energía por la gran cantidad de aire caliente saliendo por las uniones.

Utilizando una cámara termográfica se puede localizar estos defectos de manera más técnica y acertada (figura 2-5 y figura 2-7), viendo la variación de temperaturas en comparación a la temperatura ambiente (figura 2-6). La misma varía dependiendo de la hora y el clima que se tenga.

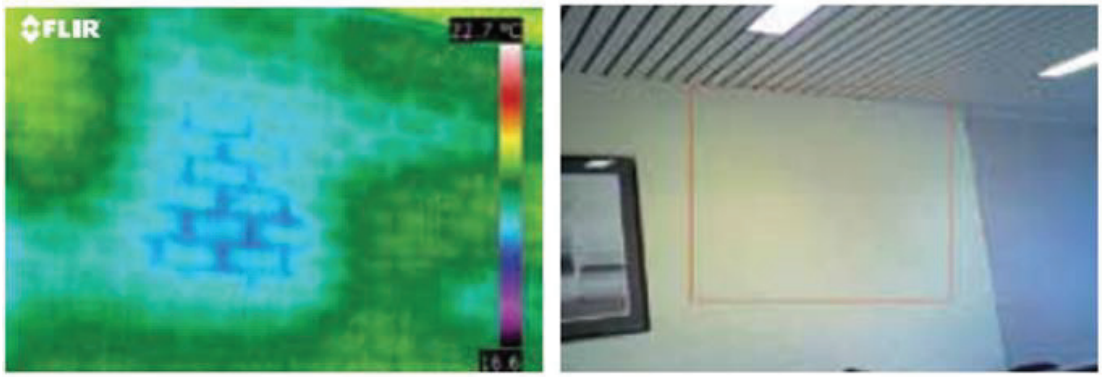


Figura 2-5 Falta aislamiento en partes del muro.
Fuente: (FLIR Systems, 2011)

Figura 2-6 Termografía de objetos en el exterior.
La imagen indica algunos escenarios: (*edificio exterior; pórtico de almacenamiento de material; automóvil*).
Fuente: Propia

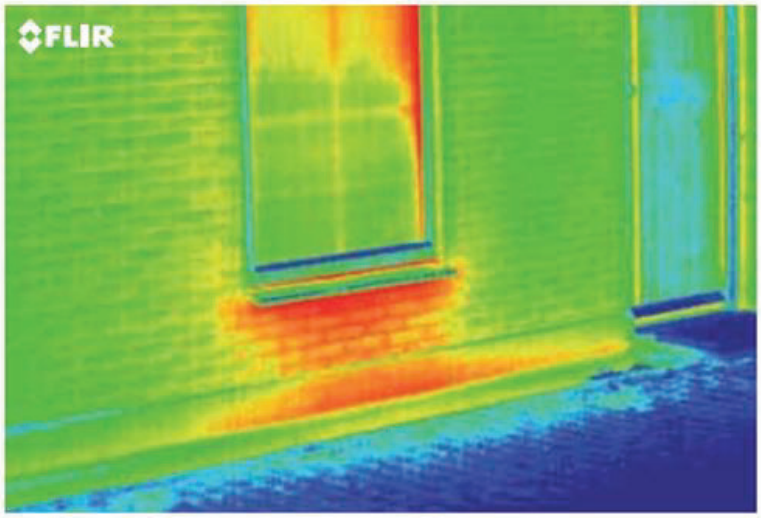


Figura 2-7 Aislamiento insuficiente en el muro bajo la ventana.
Fuente: (FLIR Systems, 2011)

2.3.2 DETECCIÓN DE FUGAS DE AIRE

En cuanto a las fugas de aire, estas sufren un mayor consumo de energía, provocando inconvenientes con el sistema de ventilación. Estas fugas provocan de igual forma condensación en la estructura lo que afecta el clima en el interior.

Para lo cual se necesita una variación de temperatura y presión (figura 2-8), de un análisis posterior de la tubería por la cual está circulando el aire, la técnica más común para este tipo de fugas es la de presurización.

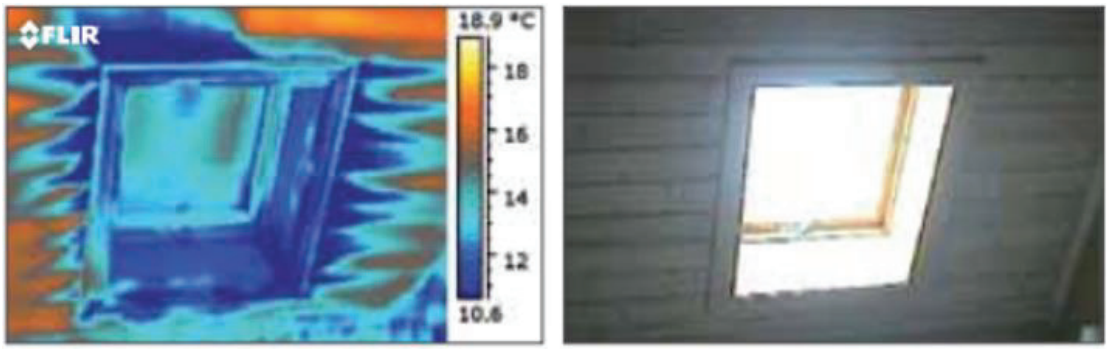


Figura 2-8 Fugas de aire entre el techo y la ventana
Fuente: (FLIR Systems, 2011)

2.3.3 DETECCIÓN DE HUMEDAD

Ya que la humedad demora un tiempo considerable en secarse, esta se convierte en el principal lugar para la propagación de moho y de hongos.

Con la ayuda de una cámara termográfica se puede ubicar el área donde se encuentran las áreas afectadas por humedad (figura 2-9), disminuyendo el riesgo de enfermedades que pueden afectar a la salud.

Figura 2-9 Filtración de humedad en el suelo.
Fuente: (FLIR Systems, 2011)

Al aplicar termografía para detectar humedad esta consiste en hacer el cambio de temperatura, de manera que el área donde se pueda evidenciar la humedad cambia de temperatura con mayor tiempo que los materiales que están secos, escaneando zonas establecidas donde entre el rango de visión de la cámara.

En la imagen (figura 2-10), la temperatura de la habitación ha cambiado rápidamente por la calefacción lo que hace que la humedad sea claramente visible en la termografía.

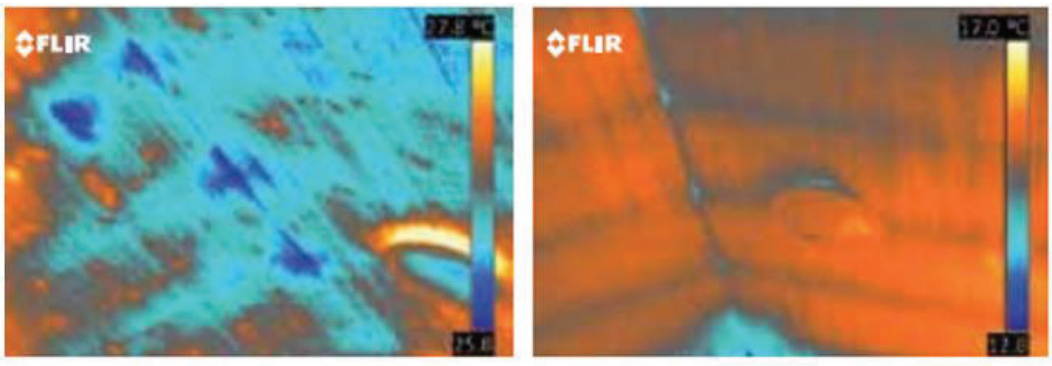


Figura 2-10 Imágenes termográficas tomadas del mismo techo.
Fuente: (FLIR Systems, 2011)

2.3.4 PUENTES TÉRMICOS

Un puente térmico es una parte de un cerramiento donde existe un cambio de resistencia térmica (figura 2-11); debido a cambios de espesor, diferencia de áreas

interior y exterior, llevando como consecuencia a un incremento de pérdidas de calor. (Díaz Regodón & Tenorio Ríos, 2010)

Los efectos comunes de los puentes térmicos son:

- Incremento de pérdidas de calor cuando se calculen las cargas, necesidades energéticas y niveles de aislamiento del edificio
- Riesgo de condensaciones y producción de moho resultante de la temperatura superficial interior de la zona del puente térmico. (Díaz Regodón & Tenorio Ríos, 2010)

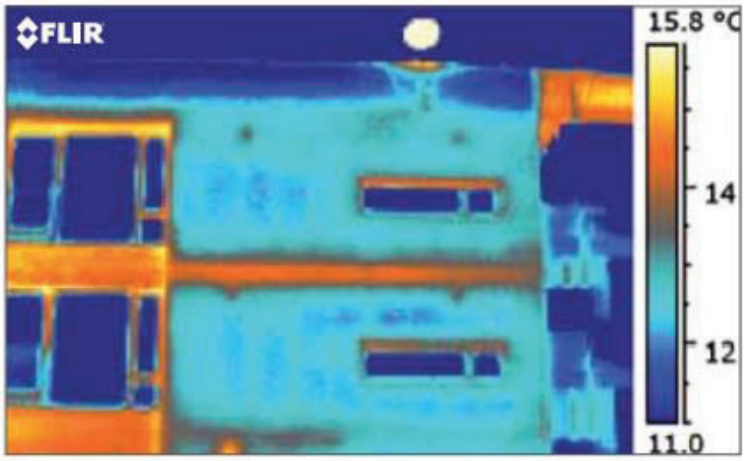


Figura 2-11 Puente térmico en uno de los pisos.
Fuente: (FLIR Systems, 2011)

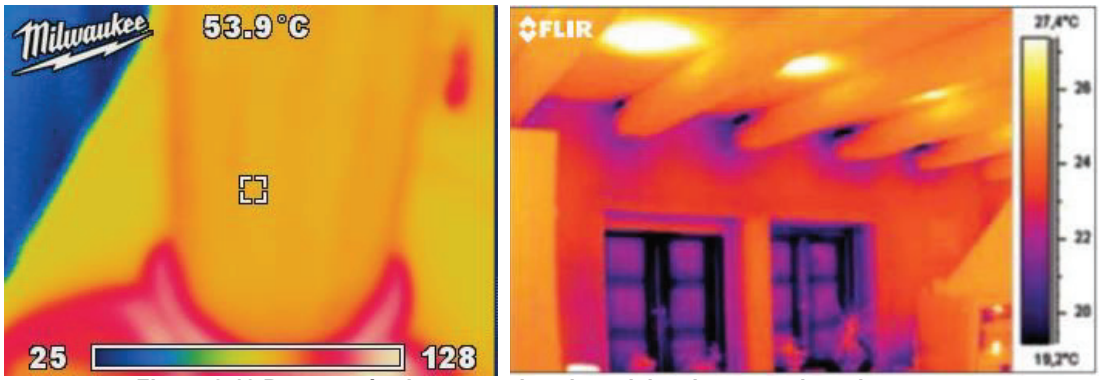


Figura 2-12 Puentes térmicos entre las vigas del techo y paredes adyacentes.
Fuente: Propia; (FLIR Systems, 2011)

2.3.5 CALEFACCIÓN Y LINEAS DE ABASTECIMIENTO

En climas fríos (figura 2-13), la temperatura del suelo y zonas de parqueadero tiende a calentarse. Donde existe un sistema de calefacción subterráneo, la cámara

termográfica muestra y ayuda a identificar la ubicación exacta del problema, reduciendo el costo de reparación de las mismas.

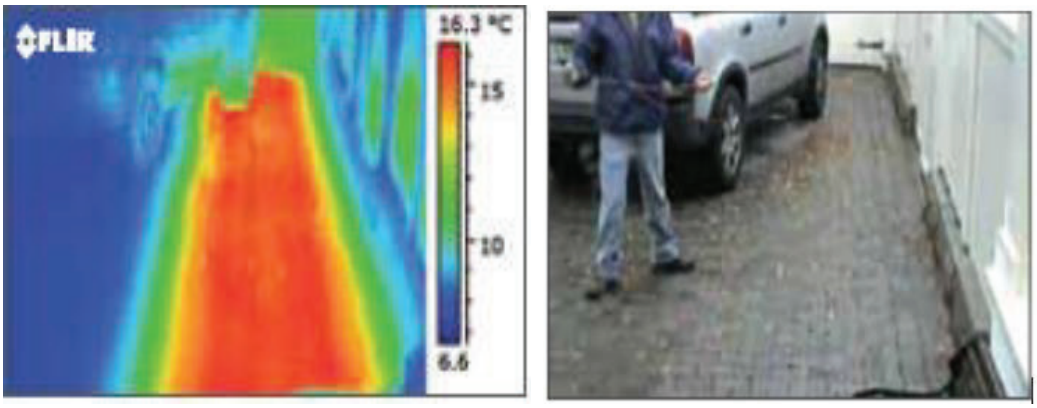


Figura 2-13 Defectos de sistemas de calefacción central.
Fuente: (FLIR Systems, 2011)

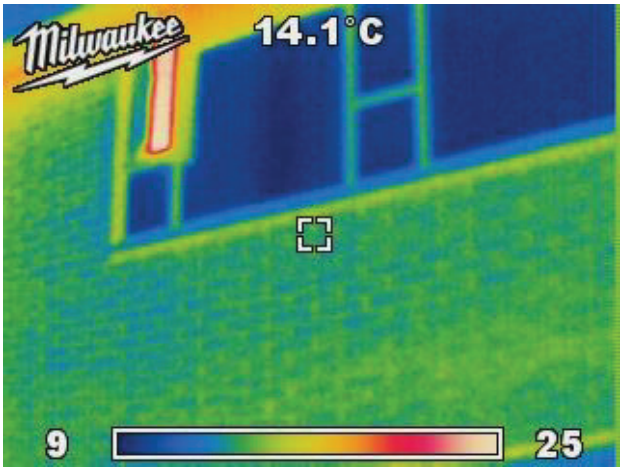
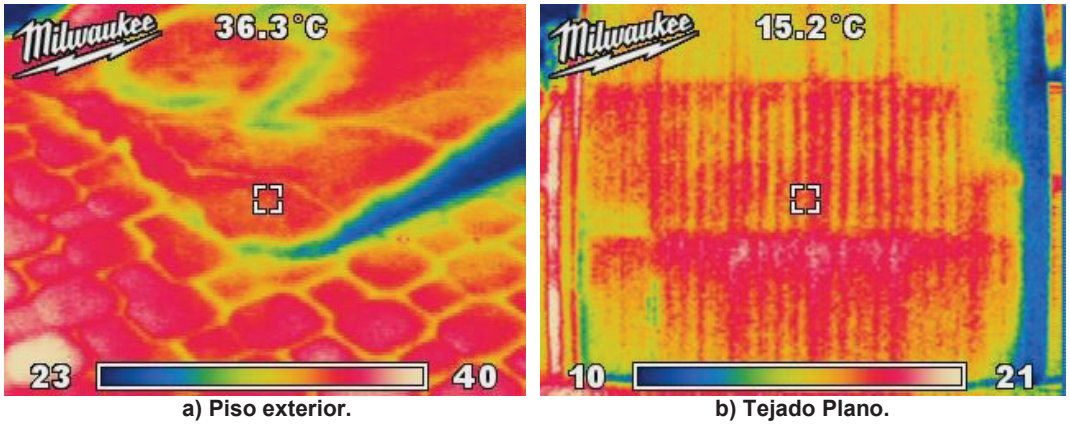


Figura 2-14 Termografía tomada a una pared con una ventana abierta con la luz encendida (noche).
Fuente: Propia

2.3.6 LOCALIZACIÓN DE FILTRACIONES DE AGUA EN TEJADOS PLANOS.

Otra aplicación de una cámara termográfica es la localización de filtraciones en tejados planos (figura 2-15 b). Ya que el agua mantiene más calor en comparación a otros materiales, se puede mostrar la presencia de filtraciones cuando el tejado ya se haya enfriado.

Disminuyendo el costo de reparación en lugar de sustituir el tajado completamente.

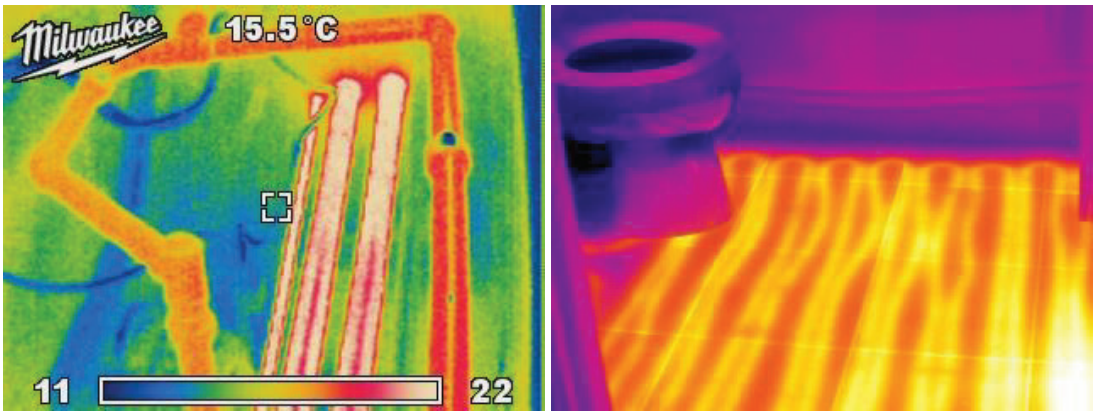


a) Piso exterior. **b) Tejado Plano.**

Figura 2-15 Filtraciones de agua.
Fuente: Propia

2.3.7 LOCALIZACIÓN DE FUGAS EN LA CALEFACCION DEL SUELO

Cuando se tiene tuberías de agua (figura 2-16) que se encuentran en el suelo o debajo de yeso, la termografía facilita el uso de localizar fugas en tuberías y conductos. El calor irradiado por la superficie y el patrón se puede mostrar de manera fácil con la ayuda de una cámara termográfica (figura 2.17).



a) Piso exterior **b) Piso de baño**

Figura 2-16 Diferencia de temperaturas por actividad radiante.
Fuente: Propia ; (FLIR Systems, 2011)

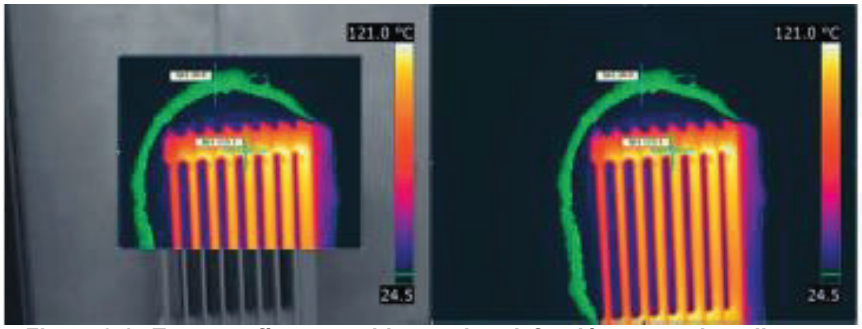


Figura 2-17 Termografía con problemas de calefacción por suelo radiante.
Fuente: (FLIR Systems, 2011)

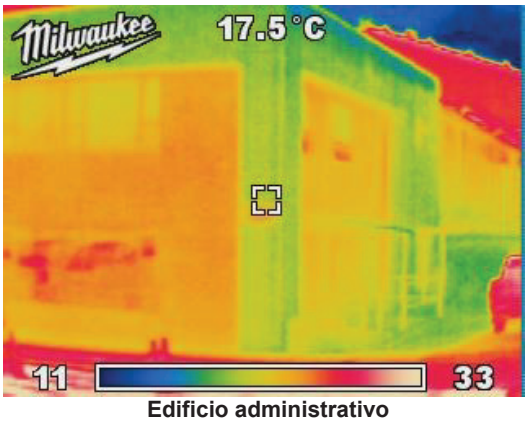
2.3.8 CONTROL DE CALIDAD

Para la inspección de edificios nuevos, el uso de termografía es utilizado de igual forma para el control de calidad.

Durante el proceso de secado, las imágenes termográficas permiten establecer el progreso de los procedimientos, de esta manera se puede acelerar el proceso, con una demostración previa de que la construcción está completamente seca, se puede reducir el tiempo de entrega a la cliente.

2.3.9 REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS

La termografía permite identificar de manera clara edificios y monumentos hechos a base de yeso. Por lo que en este caso se toma la decisión si recuperar completa o parcialmente dicho material, llevando a cabo un proceso de conservación de las mismas (figura 2-18).



Edificio administrativo
Figura 2-18 Termografía en estructuras subyacentes.
Fuente: Propia

2.3.10 TUBERÍAS

La termografía en la detección de tuberías bloqueadas o rotas y otros problemas relacionados, es otra aplicación la cual se la puede observar de mejor manera haciendo pasar por ellas agua caliente, la cual irradia calor por diferencia de temperaturas dando como resultado la zona donde se encuentra el problema.

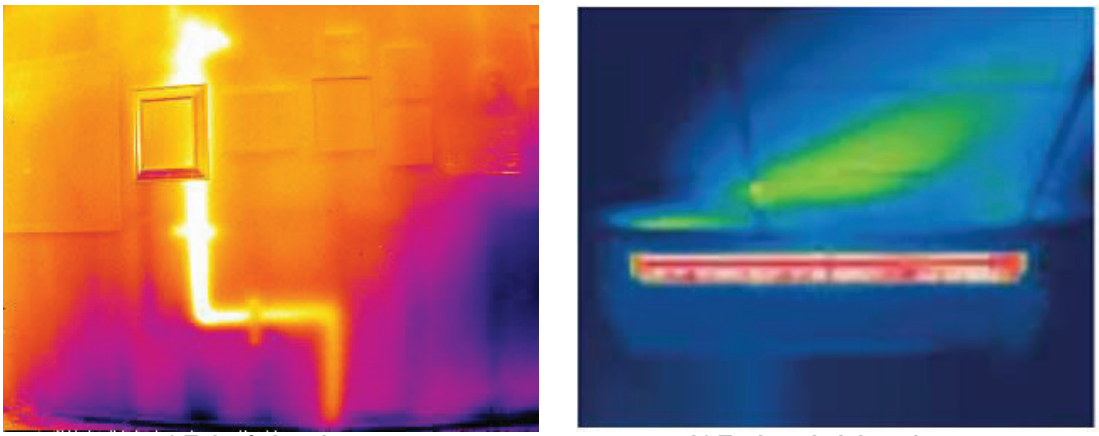
Este método se lo realiza independientemente si la tubería es visible o se encuentra detrás de una pared o bajo el suelo (figura 2-19).

a) Imagen real. b) Imagen termográfica.

Figura 2-19 Tuberías con termografía.
Fuente: Propia

2.3.11 INSTALACIÓN DE CLIMATIZACIÓN

En cuanto a los sistemas de ventilación y aire acondicionado y calefacción (HVAC), la termografía ayuda a detectar posibles filtraciones o fugas dentro del sistema de calefacción (figura 2-20 b), dando como resultado un mantenimiento preventivo adecuado, suministrando la cantidad de humedad, las temperaturas correctas y los contaminantes que pueden existir en el exterior. (Carrier Air Conditioning Company, 1980)



a) Tubería interior b) Techo administrativo

Figura 2-20 Climatización.
Fuente: (Carrier Air Conditioning Company, 1980)

2.3.12 FALLOS ELÉCTRICOS

La detección de fallos eléctricos como cuadros eléctricos, fusibles, conexiones, entre otras (figura 2-21); que no se pueden detectar a simple vista.

La detección de los mismos con termografía se la realiza cuando los elementos eléctricos están a elevadas temperaturas, reduciendo de esta manera el riesgo de incendios por corto circuitos o sobre cargas de elementos.

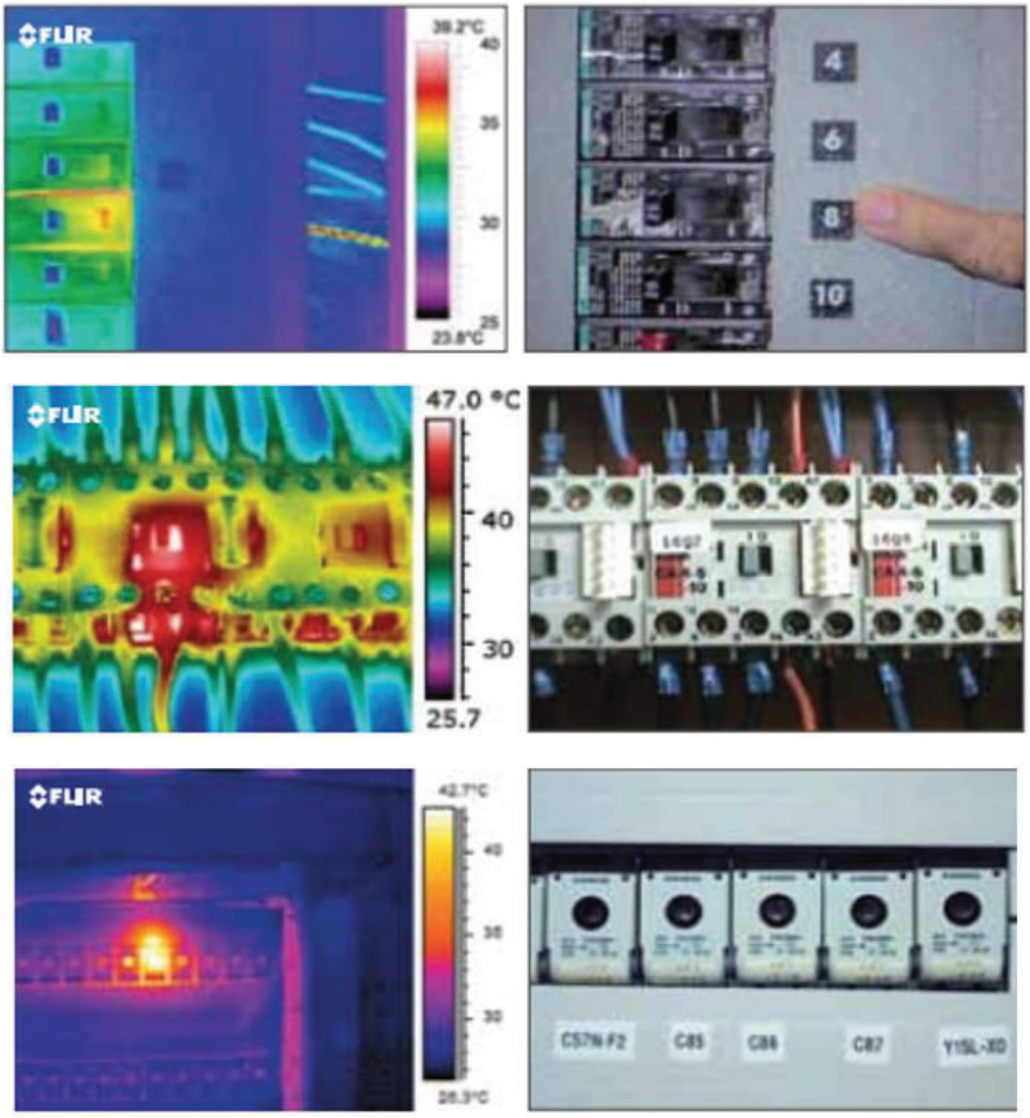


Figura 2-21 Fusibles sobrecalentados.
Fuente: (FLIR Systems, 2011)

2.4 SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN A SIMULAR

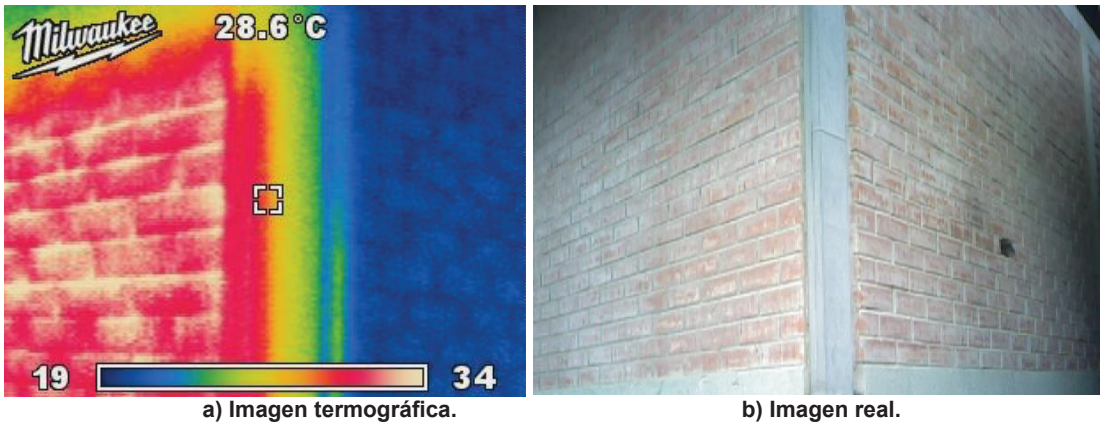
Es importante tomar en cuenta, que la cámara utilizada como referencia no percibe temperaturas. Detecta y muestra la variación de radiación infrarroja, que llega desde diferentes fuentes.

Por lo que para el análisis se seleccionó una configuración conformada por una pared de ladrillo de dimensión 2600 x 2400 x 140 mm y una columna de acero de 2600 x 80 x 140 mm.

Se tomó como referencia esta configuración, por la variación de temperaturas que se presentan. Así mismo esta configuración presenta tres modalidades de transmisión de calor, además que se puede determinar las temperaturas superficiales de los materiales, las del aire exterior e interior y la resistencia superficial (radiactiva + convectiva).

Referente a los parámetros, estos deben ser controlados para una lectura correcta de la imagen térmica; como la emisividad de las zonas, la temperatura del ambiente reflejada y la composición de los materiales. El ajuste térmico de la imagen, enfoque, encuadre, campo de visión, sensibilidad y rango de temperaturas.

A continuación, se muestra la imagen termográfica y real de la configuración establecida:



a) Imagen termográfica. **b) Imagen real.**

Figura 2-22 Configuración ladrillo – acero.
Fuente: Propia

Las imágenes fueron tomadas en dos horarios diferentes para observar de mejor manera los efectos que se producen por medio de la radiación solar emitida: al medio día donde existe la mayor cantidad de radiación solar y en la noche. Además la cámara se puede configurar con parámetros de emisividad de cada uno de los distintos materiales. La cámara genera un informe a través del software como se puede observar en el **Anexo 2 – Configuración analizada** al final de este documento.

Lo que se analizó previamente con el conjunto de imágenes tomadas como referencia; donde se evidenció una mejor resolución de los patrones térmicos, aprovechando la absorción de radiación solar, el área enfocada y la uniformidad de la configuración.

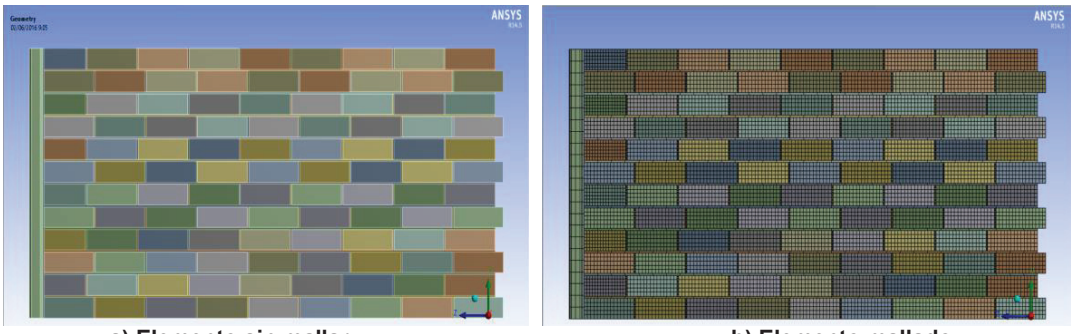
Otro punto importante para la selección de la configuración, fue un estudio realizado por *Sara García Gómez a través del documento "Prácticas externas del Máster de Innovación Tecnológica en la edificación"* (García Gómez, de la Torre Moreno, & Sánchez López, Marzo 2011) donde se analiza de manera puntual los diferentes materiales propuestos en la configuración seleccionada para el presente trabajo, así también con el cambio de emisividad en materiales cerámicos, metálicos y de hormigón.

Para el análisis se mostrará los defectos más comunes que se presentan en dicha configuración como son: falta de aislamiento, fuga debido a filtraciones, y grietas o defectos puntuales; para administrar un posible mantenimiento.

CAPÍTULO 3.

DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN TERMOGRÁFICA

El método por elementos finitos, o conocido también por análisis por elementos finitos (AEF), es una herramienta usada en ingeniería para entregar una solución aproximada de fenómenos físicos. Se basa en la descomposición de pequeños elementos o elementos de estudio (Figura 3-1 b), a este proceso se lo conoce como mallado; finalmente se resuelve las ecuaciones diferenciales correspondientes a un campo,(para este estudio la transferencia de calor). (Villacís & Villalba, 2011)



a) Elemento sin mallar **b) Elemento mallado**

Figura 3-1 Mallado.
Fuente: Propia

El proceso de Análisis por Elementos Finitos consta de los pasos siguientes.

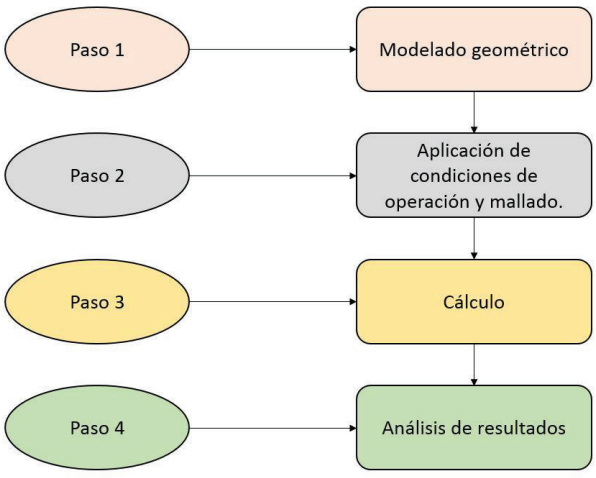


Figura 3-2 Pasos análisis de elementos finitos.
Fuente: Propia

Con la evaluación de los resultados entregados por el AEF y las referencias de las fotografías tomadas por la cámara termográfica, se realiza un estudio comparativo con la realidad y la simulación de la misma configuración.

Este estudio permite saber el comportamiento aproximado que se obtendría bajo posibles escenarios, pudiendo detectar las zonas donde se producen los principales defectos.

3.1 DESARROLLO ANALÍTICO

La configuración analizada no se encuentra en equilibrio debido a la consecuencia de la variación de las condiciones del ambiente, es decir existen procesos de aumento y disminución de temperatura, debido a la propiedad física de su masa predominante con acumulación o disipación de calor.

Se denomina conducción en estado transitorio y es el resultado que, añadiendo un proceso de acumulación de temperatura a través de la configuración, ambos variables en el tiempo, da como consecuencia el fenómeno de la inercia térmica. (Monroy, 1995)

En el caso del presente trabajo, se han identificado las condiciones para conducción unidimensional en estado transitorio para una pared plana, debido a que la configuración presenta una homogeneidad en la construcción y por su facilidad de análisis en el modelo presentado.

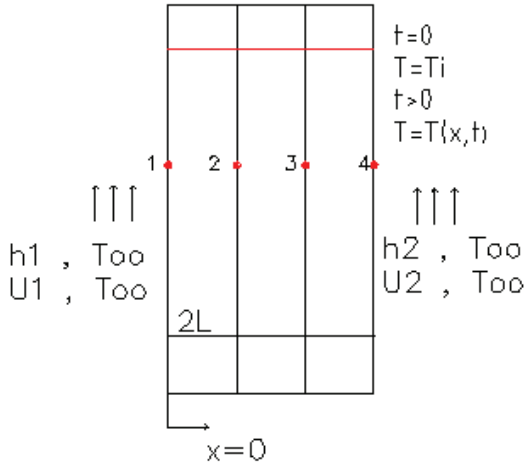


Figura 3-3 Conducción unidimensional en estado transitorio.
Fuente: Propia

La elección de la pared plana se la realiza en base a las ecuaciones de conducción y convección, ya que la configuración analizada cumple con los requerimientos para la resolución del mismo. Por lo que se establece las ecuaciones siguientes para el desarrollo del modelo que permita de manera analítica demostrar lo que está sucediendo con la transferencia de calor entre los componentes.

- **Solución analítica**:

Se ocupa la ecuación 3-1, ya que el calor entregado depende del material en cuestión, siendo de esta manera la ecuación general de transferencia de calor:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad \textbf{Ecuación 3-1}$$

$\boldsymbol{\alpha}$ se conoce como Termodifusividad (ecuación 3-2) y se define como:

$$\boldsymbol{\alpha} = \frac{K}{\rho\, C_p} \qquad \textbf{Ecuación 3-2}$$

Donde:

K Conductividad térmica del material

ρ Densidad del material

C_p Calor específico

Condiciones Iniciales, para un tiempo 0 y una temperatura inicial tomada como referencia:

$$\begin{cases} t = 0 \\ T = T_i \end{cases}$$

Condiciones de Borde:

$$\begin{cases} x = 0\,;\, h_1\,(T_{\infty 1} - T_{x=0}) = -K\left.\dfrac{\partial T}{dt}\right|_{x=0} \\ x = \mathrm{L}\,;\, h_2\,(T_{\mathrm{x=L}} - T_2) = -K\left.\dfrac{\partial T}{dt}\right|_{x=0} \end{cases}$$

Para un problema Adimensional:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \dfrac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \\ \dot{x} = \dfrac{x}{L} \\ t^* = Fo = \dfrac{\alpha t}{L^2} \end{cases}$$

Análisis nodal:

1	$h_1 A_1 (T_{\infty 1} - T_1) - \frac{kA}{\Delta x} (T_1 - T_2) = \rho A \frac{\partial x}{2} C_p \frac{\partial T_1}{\partial t}$
2	$\frac{kA}{\Delta x} (T_1 - T_2) - \frac{kA}{\Delta x} (T_2 - T_3) = \rho A \Delta x C_p \frac{\partial T_2}{\partial t}$
3	$\frac{kA}{\Delta x} (T_2 - T_3) - \frac{kA}{\Delta x} (T_3 - T_4) = \rho A \Delta x C_p \frac{\partial T_3}{\partial t}$
4	$\frac{kA}{\Delta x} (T_3 - T_4) - h_2 A (T_4 - T_{\infty 2}) = \rho A \frac{\Delta x}{2} C_p \frac{\partial T_4}{\partial t}$

Dependiendo la exactitud que se requiera, el número de nodos puede aumentar o disminuir su cantidad, con ello se encuentra de mejor manera el resultado, mejorando su exactitud en el proceso analizado. De acuerdo a los autores Incropera & DeWitt (1999), “Es el método más sencillo y conveniente para resolver problemas de conducción transitoria. Por ello es importante determinar en qué condiciones se puede usar con precisión razonable.”

Considerando la conducción en estado estable por una pared plana de área A (figura 3-3) y suponiendo condiciones de estado, este se extiende fácilmente a los procesos transitorios.

Una superficie se mantiene a T_{s1} y la otra se expone a una temperatura $T_\infty < T_{s1}$. La temperatura de cada última superficie sea algún valor intermedio, T_{s2} para que el que $T_{\infty 1} < T_{s2} < T_{s1}$.

De aquí, en condiciones de estado estable el balance de energía de la superficie se reduce a:

$$\boldsymbol{\frac{kA}{L} (T_{s1} - T_{s2}) = h A (T_{s2} - T_\infty)} \qquad \textbf{Ecuación 3-3}$$

Donde k es la conductividad térmica del sólido.

Al reacomodar la ecuación 3-3, se obtiene:

$$\frac{T_{s1}-T_{s2}}{T_{s1}-T_{\infty}} = \frac{\frac{L}{kA}}{\frac{1}{hA}} = \frac{R_{conducción}}{R_{convección}} = \frac{hL}{k} \equiv Bi$$ **Ecuación 3-4**

La cantidad $\frac{hL}{k}$ que aparece en la ecuación es un parámetro adimensional denominado número de Biot, utilizado en problemas de conducción que involucran efectos de convección superficial como se indica en la figura 3-4, y en especial las condiciones que corresponden a $Bi \ll 1$. Esto indica que, para esta condición es razonable suponer una distribución de temperatura uniforme a través de un sólido en cualquier momento durante el proceso transitorio. Debido a que la temperatura es analizada en un instante para un tiempo específico.

En consecuencia, es razonable la suposición de una distribución de temperatura uniforme.

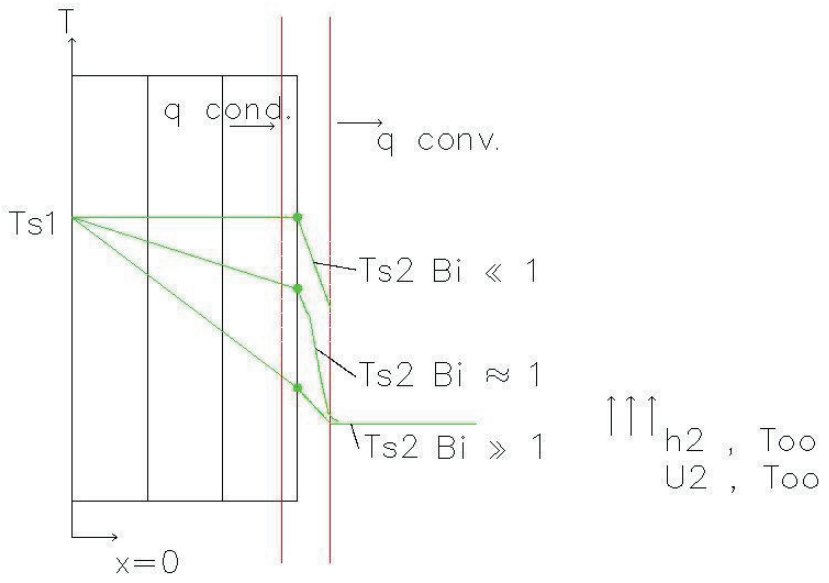


Figura 3-4 Solución analítica.
Fuente: Propia

Efecto del número de Biot en la distribución de temperatura de estado estable en una pared plana con convección en la superficie.

El número de Biot (ecuación 3-5) se debe calcular primordialmente debido a su significado y simplicidad para los problemas de conducción transitoria, como es el caso de este trabajo.

$$\boldsymbol{Bi = \frac{h\,L_c}{k} < 0,1} \qquad \textbf{Ecuación 3-5}$$

"El error asociado con el uso del método de la resistencia interna despreciable es pequeño. Por sencillez, se acostumbra definir la longitud característica de la ecuación como la relación entre el volumen del sólido y el área de la superficie $L \equiv \frac{V}{A_S}$. Esta definición facilita el cálculo de L_c en solido de forma complicada y reduce a la mitad el espesor L para una pared plana de espesor $2L$." (Incropera & DeWitt, 1999)

Finalmente, se observa que, con $L \equiv \frac{V}{A_S}$ el exponente de la ecuación 3-6 se expresa como:

$$\boldsymbol{\frac{h\,A_s\,t}{\rho\,V_c} = \frac{h\,t}{\rho\,C\,L_c} = \frac{h\,L_c}{k}\,\frac{k}{\rho\,C}\,\frac{t}{L_c^2} = \frac{h\,L_c}{k}\,\frac{\alpha\,t}{L_c^2}} \qquad \textbf{Ecuación 3-6}$$

$$\boldsymbol{\frac{h\,A_s\,t}{\rho\,V_c} = Bi\,Fo} \qquad \textbf{Ecuación 3-7}$$

Donde $Fo = \frac{\alpha\,t}{L^2}$, denominado número de Fourier.

En un tiempo adimensional que, junto con el número de Biot, caracteriza los problemas de conducción transitoria.

$$\boldsymbol{\frac{\theta}{\theta_1} = \frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty} = \exp(-Bi\,Fo) = \theta^*} \qquad \textbf{Ecuación 3-8}$$

La expresión mostrada (ecuación 3-8) indica la variación de temperatura que se presenta nodo a nodo. De esta manera el software de elementos finitos ANSYS, simplifica el trabajo. Para un mejor entendimiento de lo expuesto, ver ***Anexo 8 - Comandos realizados por ANSYS para Convección y Anexo 9 - Comandos realizados por ANSYS para Conducción y Radiación***.

3.2 APLICACIÓN DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS ANSYS

El desarrollo de la simulación se realizó por medio de la plataforma de ANSYS. Este software de elementos finitos permite realizar un análisis completo de variación de temperatura en estado transitorio.

La simulación se realizó en base a los defectos anteriormente descritos.

3.2.1 LEVANTAMIENTO DE PLANOS

Como una actividad inicial se tomó como referencia una configuración de una pared que consta de ladrillos y una viga de acero (ver figura 2-22 configuración ladrillo - acero).

3.2.2 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS MEDIANTE EL SOFTWARE ANSYS

Los parámetros se refieren a un área establecida sobre una superficie total (interna o externa) donde puede producirse un cambio de temperatura tomando en cuenta su emisividad.

Al momento de llevar a cabo la simulación, es de suma importancia la precisión empleada para modelar y especificar las condiciones físicas reales (convección, radiación, conducción, emisividad de los materiales). Ya que ubicando de una manera adecuada estos parámetros afectan directamente a la calidad de los resultados obtenidos.

El análisis térmico que presenta la plataforma de ANSYS es adecuado para propiedades de transferencia de calor, donde se pueden ubicar de una manera acertada e independiente para cada elemento a analizar los diferentes parámetros necesarios para un estudio de transferencia de calor, e incluye las diferentes propiedades que se deben agregar para los mismos.

3.2.3 CARACTERISTICAS DEL ANÁLISIS POR ESTUDIO DE EMISIVIDAD

Las características que presentan son:

- La energía máxima irradiada por un cuerpo negro en función de la energía emitida tomada como referencia a la misma temperatura, medida en porcentaje.
- Se encuentra en un rango de valores que van ponderados del 0 al 1, siendo el cuerpo con mayor emisividad el que posee un valor cercano al 1; esto quiere decir cuan próxima esta la superficie a ser un cuerpo negro.
- La emisividad actúa en función de otras variables, que incluyen color y rugosidad de la superficie, misma que es afectada por la medición de las radiaciones térmicas emitidas por un material específico.
- Presenta una variación que depende de la temperatura y longitud de onda.
- Cada material cuenta con esta propiedad independiente de la posición en la que se encuentre.

3.2.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La mayor parte de las plataformas que cuentan con análisis de resultados, son realizadas por medio de colores, lo que ayuda a visualizar y entender de una mejor manera el comportamiento de las configuraciones. (Villacís & Villalba, 2011)

En la mayoría de los casos, los resultados que se presentan de color rojo son los de mayor interés, ya que representan los valores máximos.

Cada uno de los resultados obtenidos por medio de la simulación proporciona información sobre el efecto que se produce en el elemento. Debido a ello esta es la etapa donde se debe ejercer un mayor grado de criticidad, para de esta manera verificar que los resultados obtenidos sean lo más coherentes posibles según los principios de ingeniería.

Una buena interpretación de resultados será la clave para identificar:

- Áreas de debilidad del modelo
- Áreas de transferencia mínima o nula.

3.2.5 CONDUCCIÓN, CONVECCIÓN, RADIACIÓN Y EMISIVIDAD DE LOS MATERIALES

Los parámetros principales (ecuación 3-9 y 3-10) correspondientes a un análisis de transferencia de calor se definen por: (Incropera & DeWitt, 1999)

- Convección

$$q'' = h * (T_s - T_\infty) \qquad \text{Ecuación 3-9}$$

- Radiación

$$q''_{rad} = \varepsilon * \sigma * (T_s{}^4 - T_\infty{}^4) \qquad \text{Ecuación 3-10}$$

- Emisividad

$$0 \leq \varepsilon \leq 1$$

Una vez que se conoce que, la radiación que viene de fuentes externas al objetivo a analizar, la emisividad, es la radiación emitida debido al dato de temperatura. Esta depende marcadamente del material y del acabado de la superficie, y esta tabulado. (Ver Tabla 1-1).

3.2.6 PROCEDIMIENTO PARA GENERAR UN ANÁLISIS TÉRMICO

Tabla 3-1 Procedimiento para generar un análisis térmico

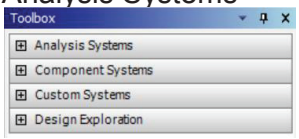
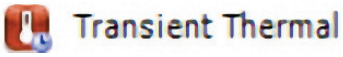
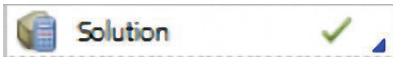
Herramientas	Pasos	Descripción
Analysis Systems 	Paso 1	Permite crear una simulación y seleccionar el tipo de análisis a estudiar.
Transient Thermal 		Permite crear un análisis térmico transitorio.
Engineering Data		Parámetros iniciales de cada material; de ser necesario se adjuntara los diferentes materiales a utilizarse.

Tabla 3-1 Procedimiento para generar un análisis térmico (Continuación)

Geometry		Importa o crea un modelo realizado con sus respectivas propiedades termo físicas para cada uno de los componentes del modelo.
Model	Paso 2	Divide la geometría del objeto de estudio en diferentes elementos; define las condiciones de borde y genera una solución a las diferentes ecuaciones de campo.
Setup		Entrega una interpretación gráfica y por capas de la transferencia de calor emitida en el modelo.
Solution 	Paso 3	Permite un análisis puntual a un determinado elemento; y un análisis general de la composición.
Results	Paso 4	Crea un informe detallado con todos los parámetros analizados anteriormente.

Fuente: Propia

3.2.7 EJECUCIÓN DE ANÁLISIS TÉRMICO A UNA CONFIGURACIÓN ESPECÍFICA

Para el análisis térmico se tomará como base el programa de simulación de ANSYS, para lo que se escoge el análisis *"Transient Thermal"*; a continuación, se detallan el procedimiento a seguir:

3.2.7.1 Paso 1

Consiste en la obtención de un modelo dibujado en 3D, con datos reales y ensamblado de tal manera que se asemeje a la configuración a analizar.

El modelado de la configuración en cuestión se lo realizó con la ayuda del software SOLIDWORKS (figura 3-5), tomando las medidas propias de la configuración, así mismo de la definición de los materiales a usarse.

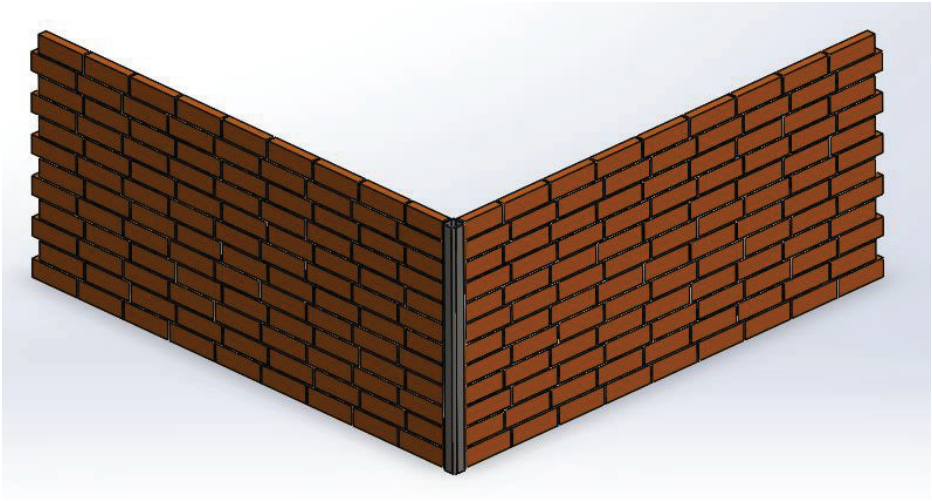


Figura 3-5 Configuración establecida (Solidworks).
Fuente: Propia

Una vez escogido el análisis a estudiar, seleccionar e introducir los parámetros:

- Material. - Isotrópico.
- Conductividad térmica, calor específico, coeficiente de expansión térmica, temperatura de referencia de: ladrillo, cemento, y acero.

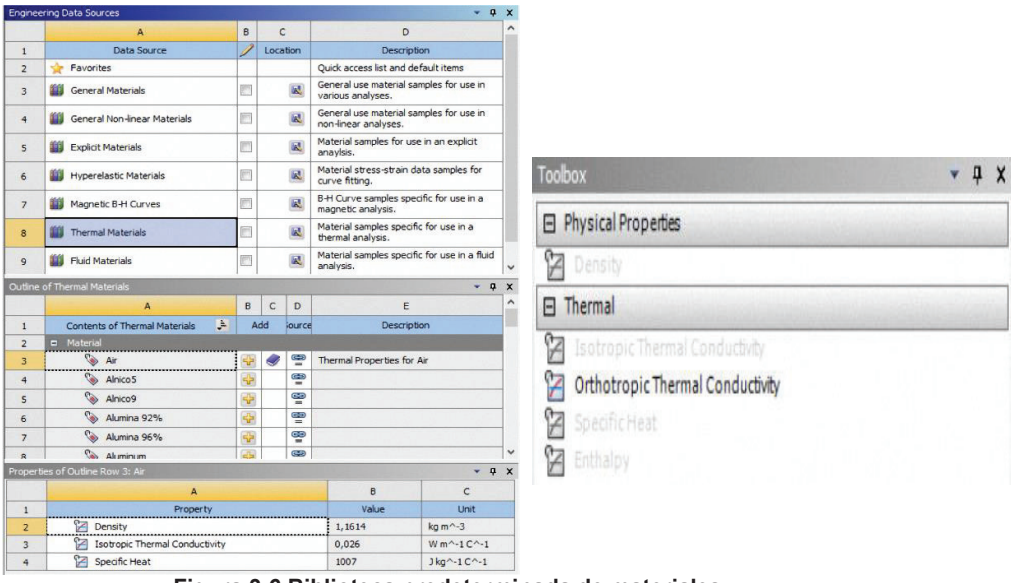


Figura 3-6 Biblioteca predeterminada de materiales.
Fuente: Propia

Se selecciona los diferentes materiales de la biblioteca predeterminada (figura 3-6) que está incluida en el programa; de no existir la propiedad que se requiera, el programa da la opción de agregar manualmente las propiedades necesarias para su correcto análisis (figura 3-7).

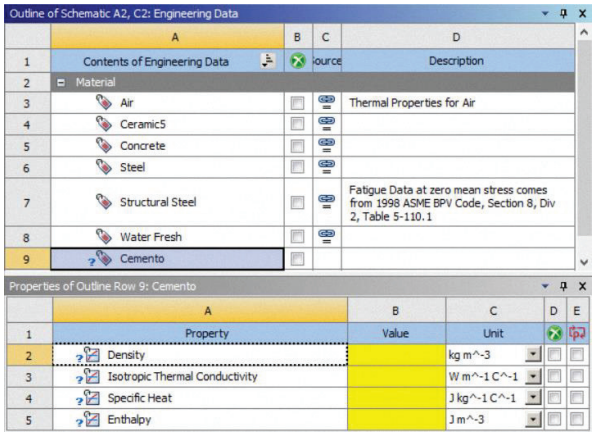
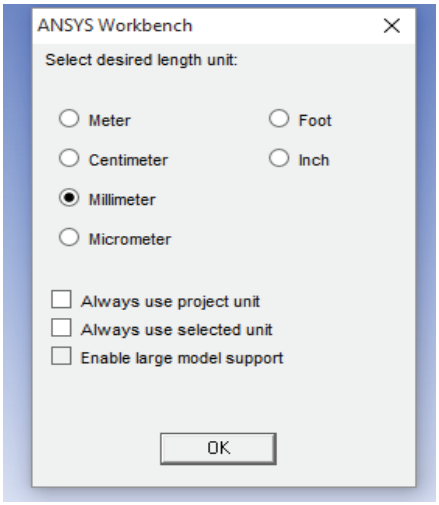
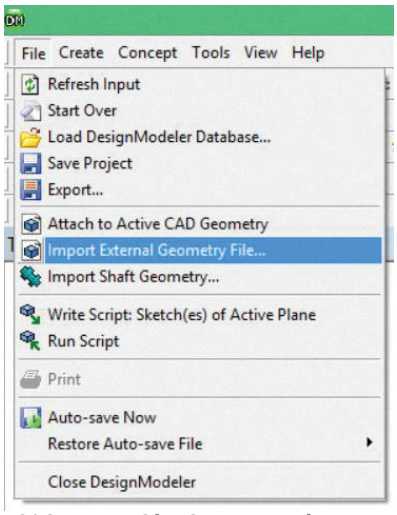


Figura 3-7 Introducción de parámetros iniciales (manualmente).
Fuente: Propia

En la fase de Geometría se elige las unidades a utilizar (figura 3-8 a), y se importa el modelo para el análisis en la plataforma de ANSYS en formato *"IGES (.igs) o Parasolid (.x_t)"* para poder importar en el programa (figura 3-8 b), esta extensión permite conservar el modelo íntegro y con los materiales definidos anteriormente, de igual forma las unidades predeterminadas por el material.





a) Unidades **b) Importación de geometría externa**

Figura 3-8 Unidades e importación de elemento a estudiar.
Fuente: Propia

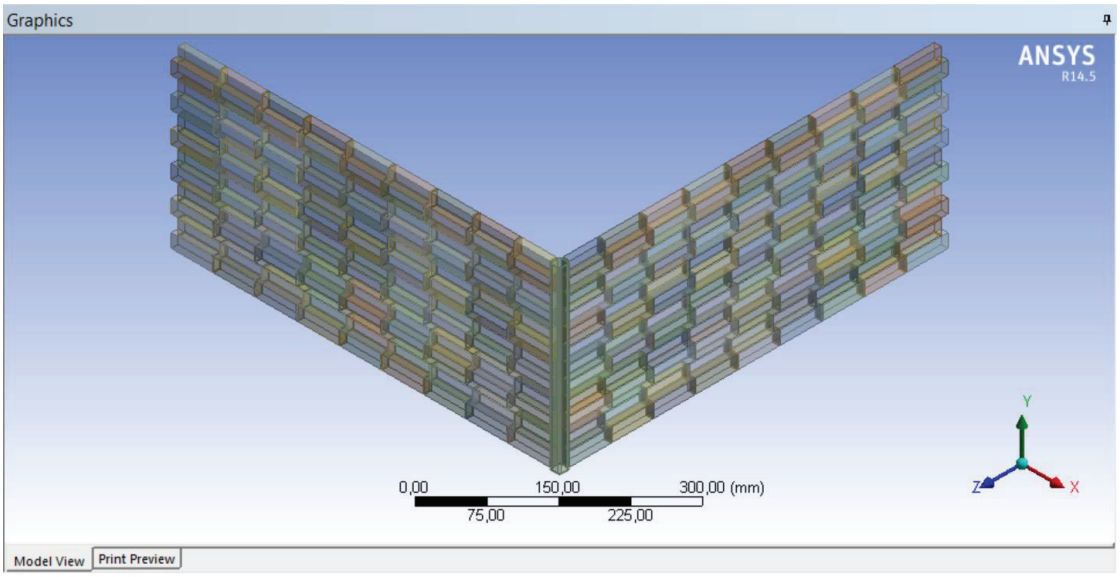


Figura 3-9 Modelo 3D – ANSYS.
Fuente: Propia

Para esta opción se debe generar el sólido o configuración; una vez definido el modelado en la pestaña *"Geometry"* se encontrará que el modelo está completamente definido (figura 3-9).

3.2.7.2 Paso 2

Definir los diferentes parámetros a tomar en cuenta para la simulación (figura 3-10), que incluyen: material, temperatura, radiación y convección definidos independiente; así mismo la preparación de mallado.

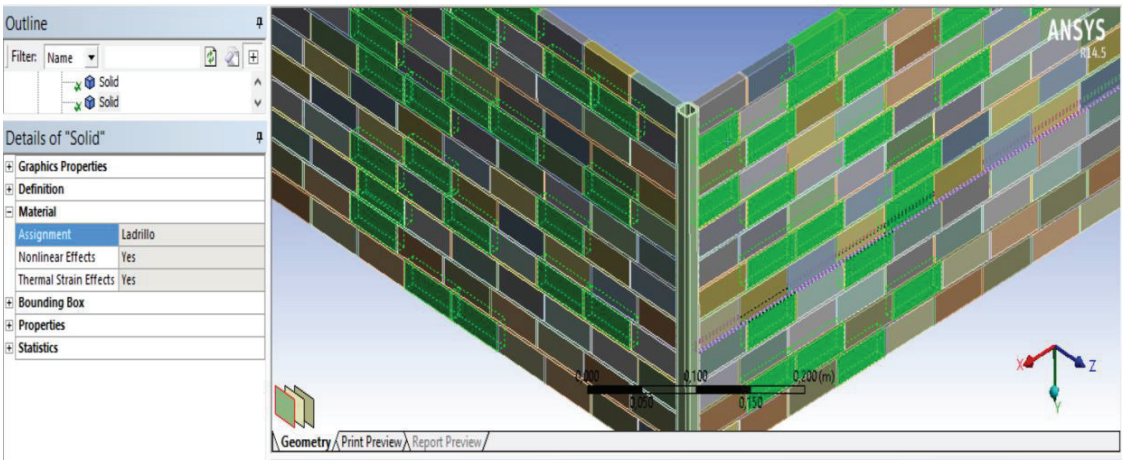


Figura 3-10 Asignación de material para cada elemento a analizar.
Fuente: Propia

- Temperatura

La temperatura inicial depende del contacto que se tiene con el medio externo e interno, para el estudio se toma como referencia la temperatura ambiente de 22 °C y la temperatura máxima a la que se va a llegar según las referencias tomadas con la cámara termográfica de 35 °C.

- Convección

Esta propiedad se la introduce en forma manual dependiendo del contacto que se tiene, para este caso es de 10 $\frac{W}{m^{2\circ}C}$, equivalentes al coeficiente de película del aire que se encuentra en contacto directo con la pared externa de la configuración a analizar.

- Radiación

De igual forma esta propiedad es aplicada para cada material de la configuración debido a la radiación emitida por el sol; datos obtenidos de la *Tabla 1-1* de emisividad.

Hay que tomar en cuenta que la propiedad de emisividad cambia para cada material analizado.

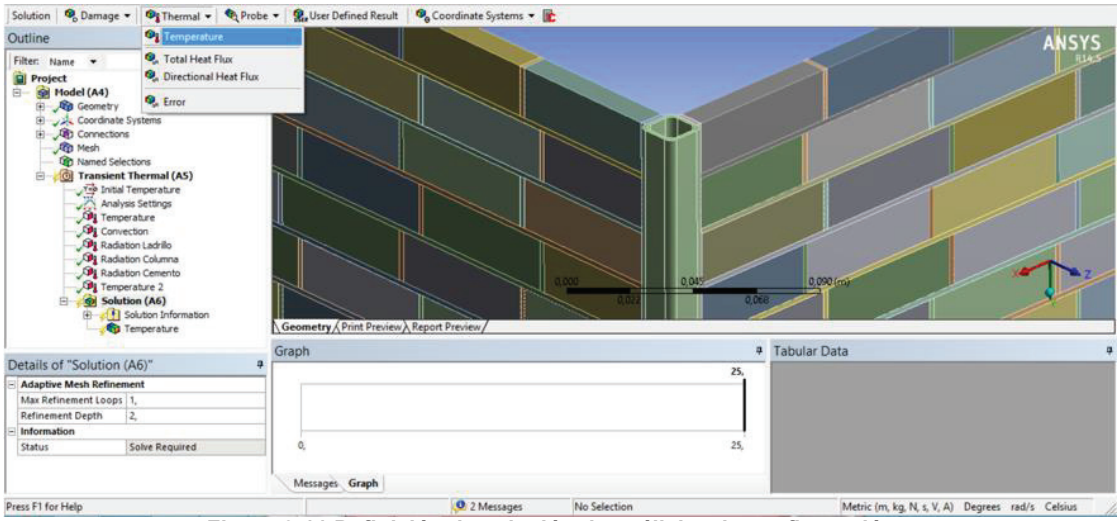


Figura 3-11 Definición de solución de análisis a la configuración.
Fuente: Propia

- Creación de malla

La configuración se divide en varios elementos que serán resueltos por mediante el método de elementos finitos que proporciona el programa (figura 3-12), permitiendo crear el mallado, con las siguientes variantes:

- Referencia al centro
- Aislamiento
- Transición
- Tamaño.

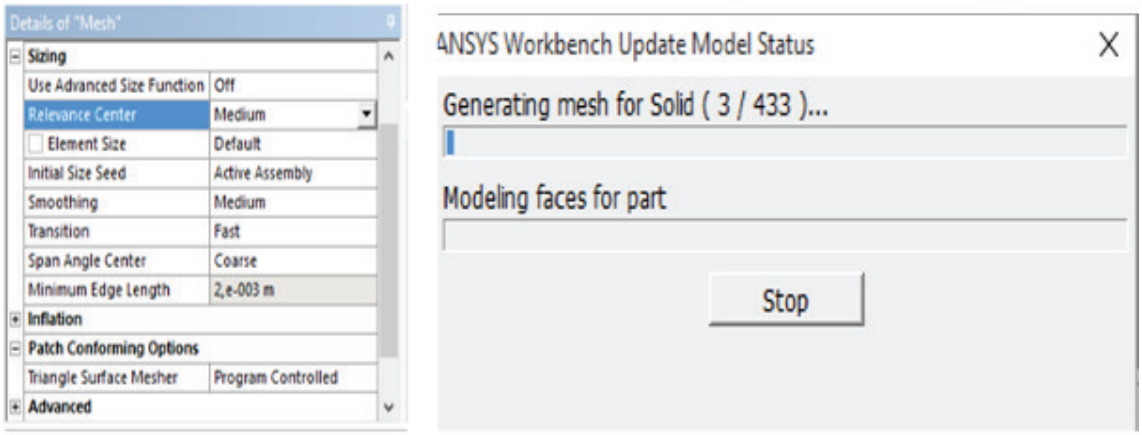


Figura 3-12 Propiedades y elaboración de mallado.
Fuente: Propia

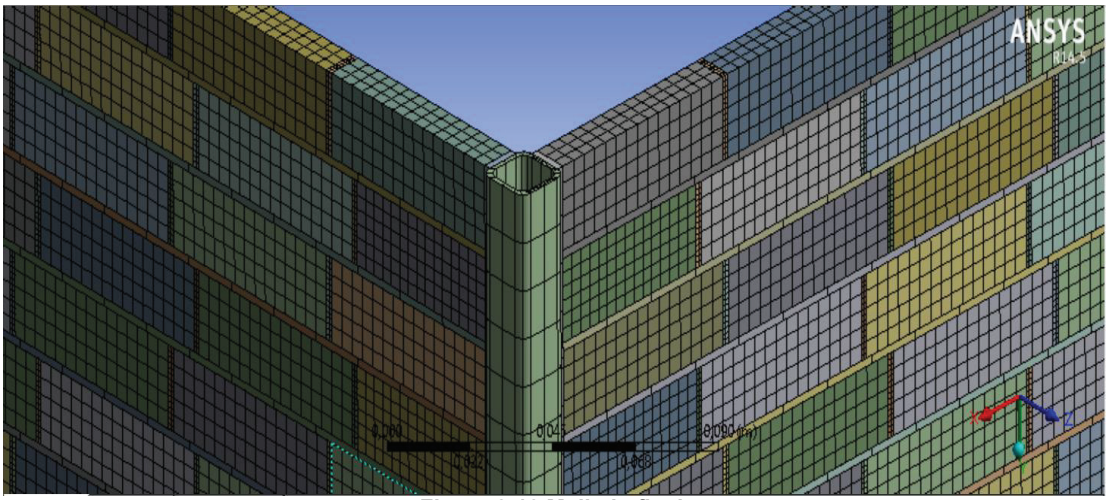


Figura 3-13 Mallado final.
Fuente: Propia

Con el fin de alcanzar resultados más cercanos a la realidad, se utilizó un mallado fino con una distribución rápida (figura 3-13).

- Análisis de convergencia

El análisis de convergencia de un método numérico es el que garantiza de que, al realizar un determinado número de iteraciones (repeticiones), las aproximaciones obtenidas terminan por acercarse cada vez más al valor verdadero.

El estudio se realizó en un principio con 5000 iteraciones, sugerido por el software demorándose alrededor de 6 horas (figura 3-14). Se puede observar que el valor se estabiliza a las 1000 iteraciones en primera instancia; por lo tanto se redujo el número de iteraciones a esta cantidad (figura 3-15).

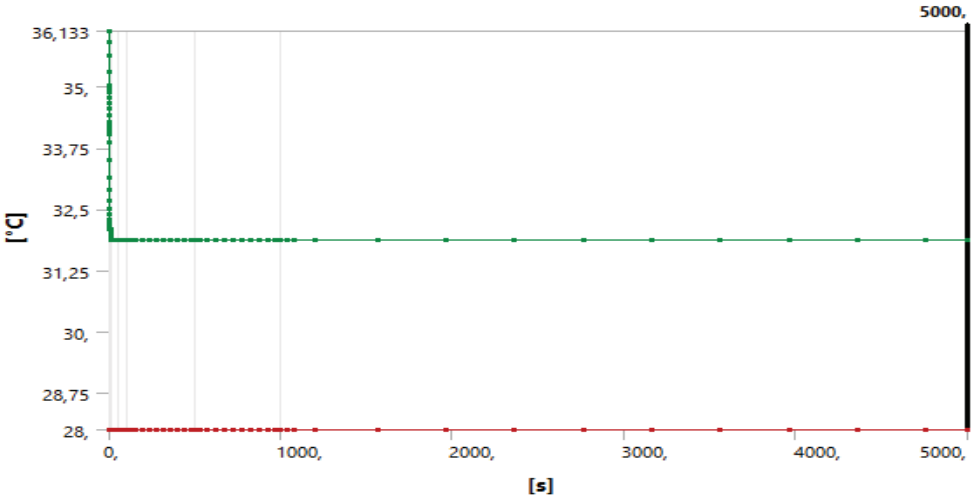


Figura 3-14 Diagrama con 5000 iteraciones
Fuente: Propia

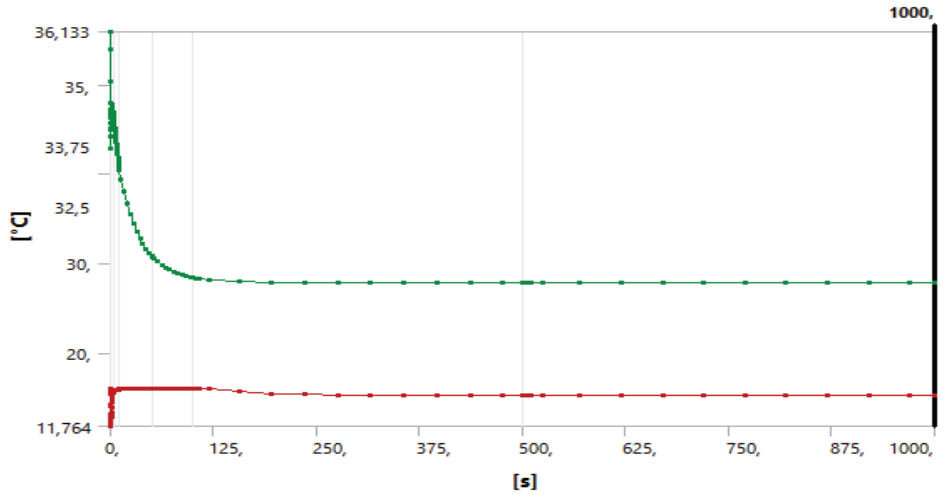


Figura 3-15 Diagrama con 1000 iteraciones.
Fuente: Propia

Como se observa en la figura 3-15, la temperatura se estabiliza aproximadamente a las 200 iteraciones con un tiempo total de simulación de 3 horas. Se procedió a acortar el número de iteraciones a 200 con lo cual se reduce el tiempo total de simulación a la mitad, como se muestra en la figura 3-16.

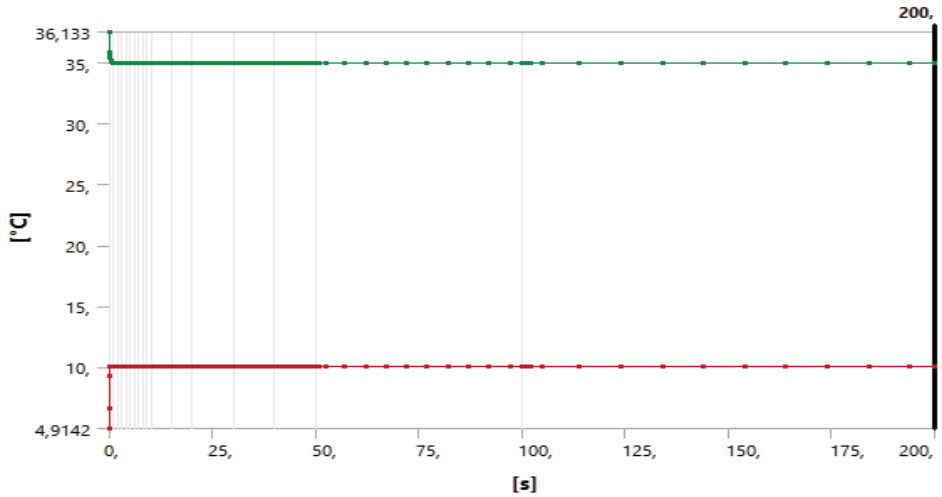


Figura 3-16 Diagrama con 200 iteraciones.
Fuente: Propia

En la figura 3-16, se nota que el número de iteraciones es grande para poder apreciar la temperatura a la que se encuentra la configuración; por lo que se reduce a 10 iteraciones, con lo cual se puede observar de mejor manera la temperatura (figura 3-17).

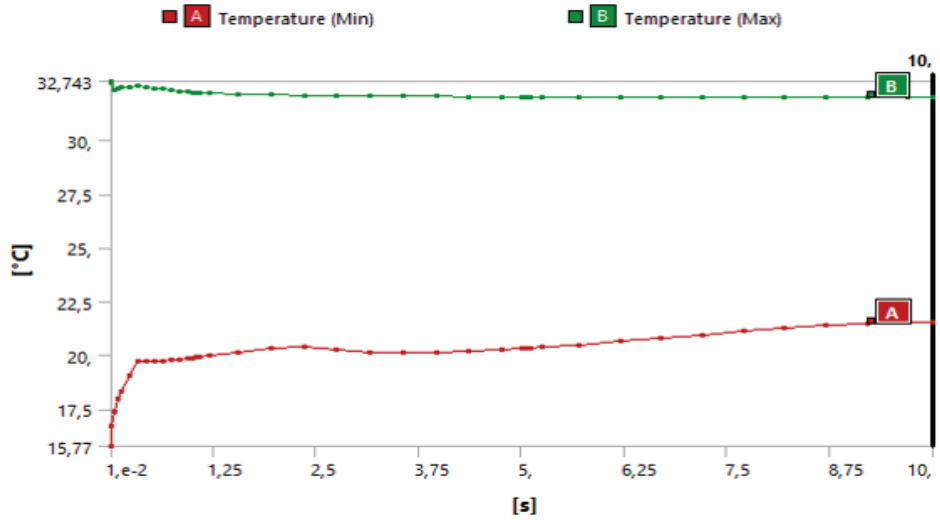


Figura 3-17 Diagrama de 10 iteraciones.
Fuente: Propia.

3.2.7.3 Paso 3

- Simulación

Se encuentra una solución de manera iterativa, es decir que se obtiene en cada elemento en cual se descompone la geometría. Este caso se analiza paramétricamente con iteraciones en función del tiempo hasta que la temperatura se estabilice (figura 3-17).

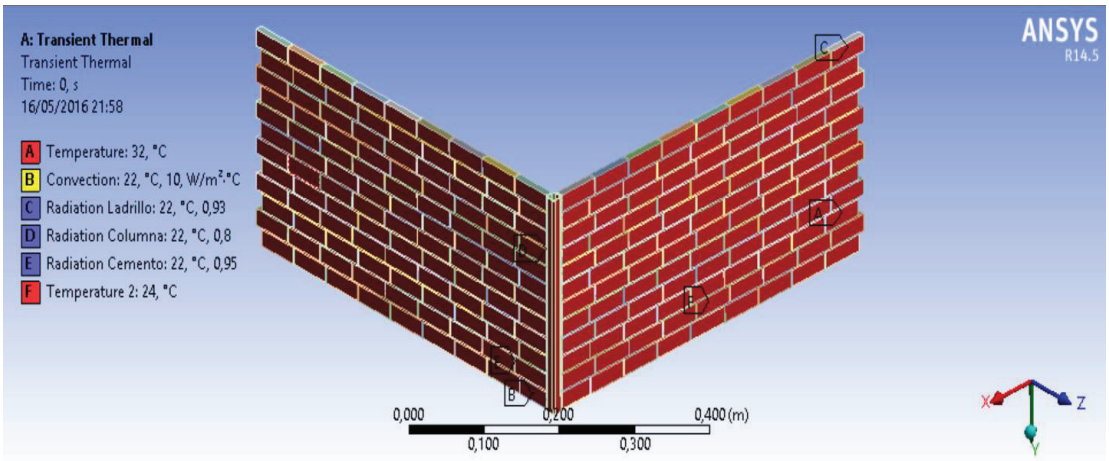


Figura 3-18 Propiedades para cada elemento de la configuración.
Fuente: Propia

Una vez definido completamente todos los parámetros (figura 3-18):

- Agregar las temperaturas para cada pared, ya que estas están expuestas a diferentes medios. *Temperatura 1 y 2.*
- La radiación emitida en cada medio dependiente de la emisividad dada por cada material analizado. *Radiation 1, 2, y 3 (ladrillo, columna, cemento).*
- Tomar en cuenta que para el análisis transitorio se debe crear una superficie externa que simule el volumen de aire que, permite tener una transferencia de calor adecuada con los parámetros anteriormente definidos (figura 3-19). *Convection 1.*

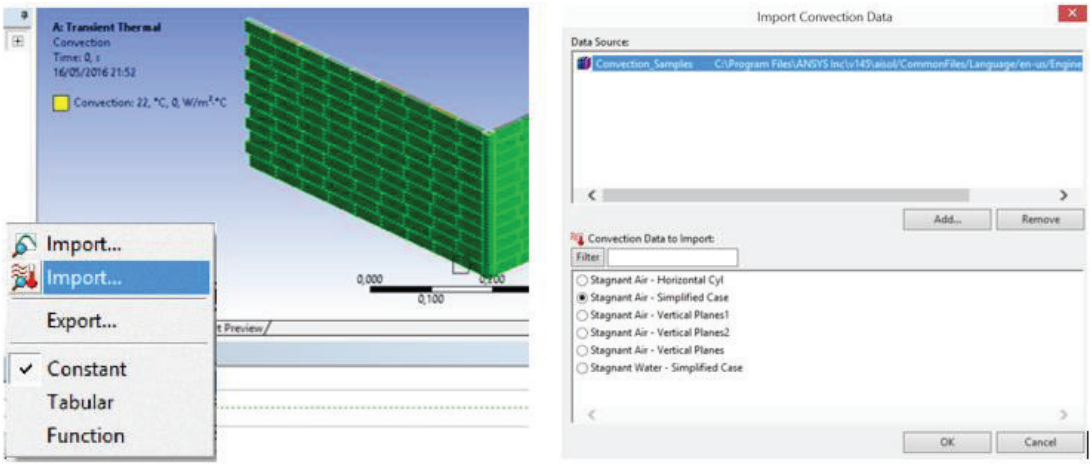


Figura 3-19 Parámetro de convección de aire.
Fuente: Propia

Si el análisis no presenta ningún problema el programa procede a realizar la simulación y generación de resultados (figura 3-20 y 3-21).

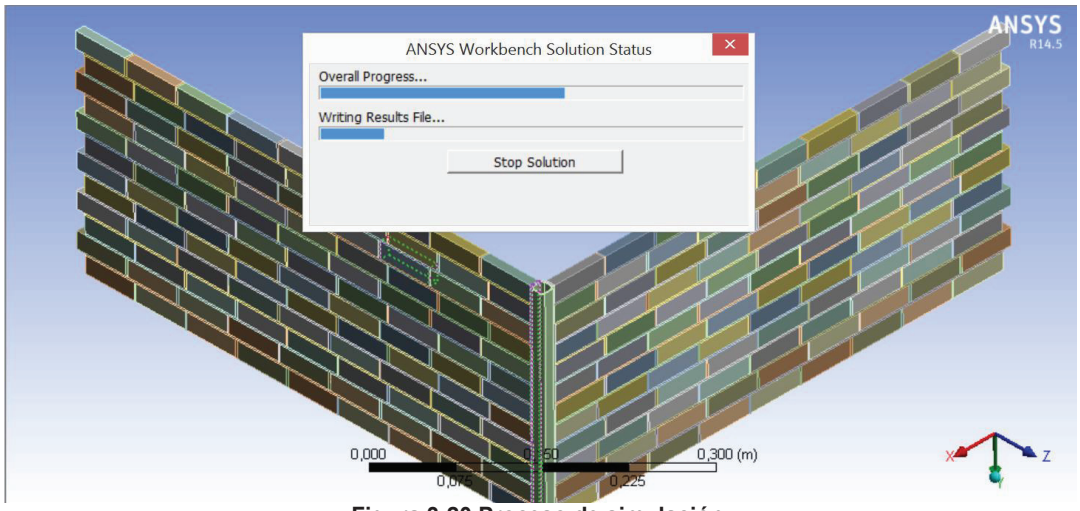


Figura 3-20 Proceso de simulación.
Fuente: Propia

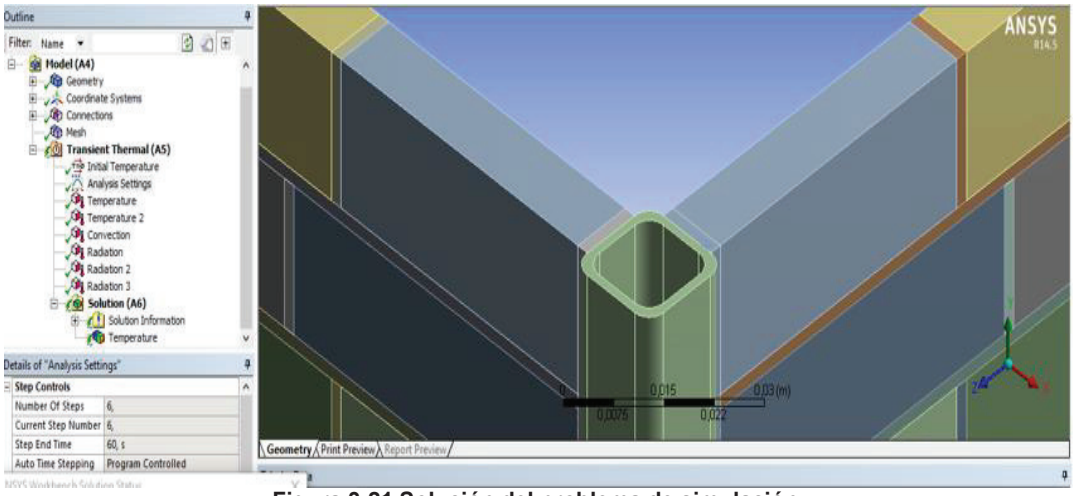


Figura 3-21 Solución del problema de simulación.
Fuente: Propia

La simulación tomó alrededor de 1 hora y 30 minutos en un computador con un procesador Intel Core i7 de 8GB de memoria RAM.

3.2.7.4 Paso 4

- Informe

Una vez ejecutada la simulación, el programa, da la opción de exportar en forma detallada los datos obtenidos, con todos los parámetros y propiedades (figura 3-18), así como la gráfica utilizada en el proceso.

La figura 3-22 muestra la distribución de temperatura que se presenta al tiempo 0 segundos, con una Tmáx = 27 °C y una Tmín = 16 °C, que son los parámetros antes de que el sol irradie calor sobre la configuración, hasta llegar a la temperatura deseada tomada como base de estudio (figura 3-17 y 3-18). Por otro lado en la figura 3-23 se observa la distribución de temperaturas a las que llegó la configuración después de un tiempo determinado de exposición a la luz solar; dándose a notar que la mayor transferencia de calor se produce en la columna de acero.

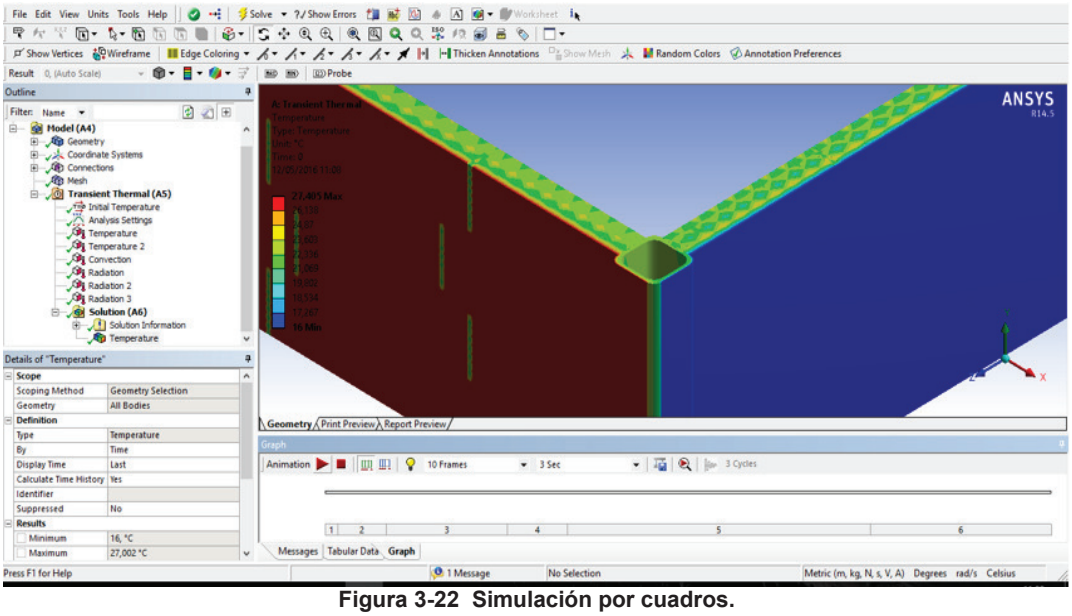


Figura 3-22 Simulación por cuadros.
Fuente: Propia

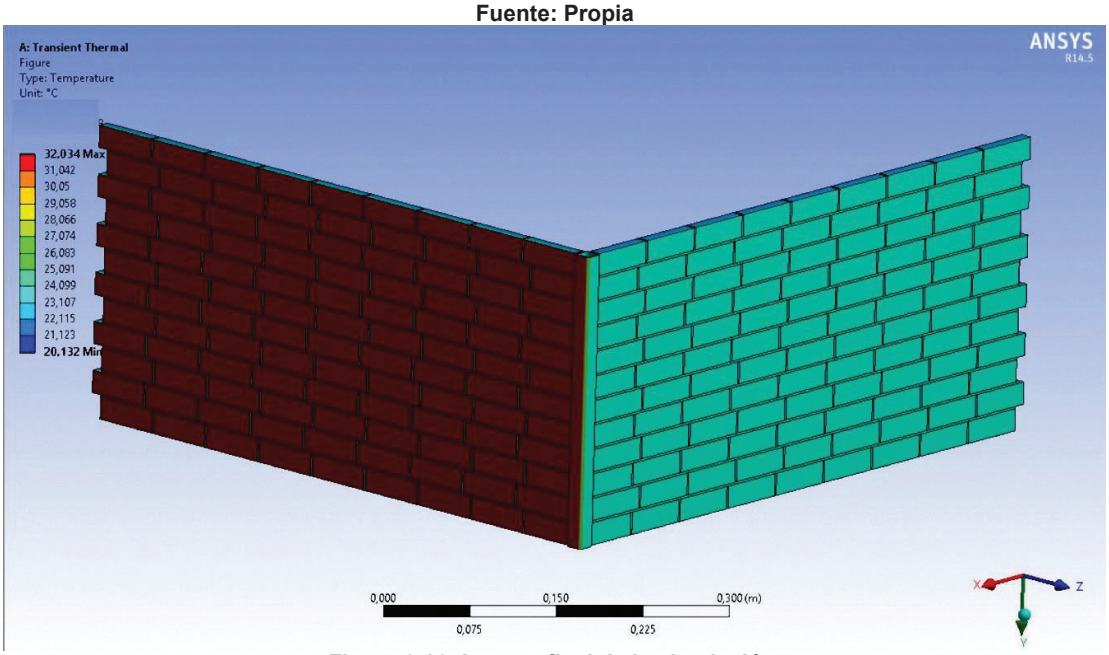


Figura 3-23 Imagen final de la simulación.
Fuente: Propia

De esta manera se finaliza la simulación; permitiendo visualizar de manera más dinámica los diferentes defectos que se producen. De igual forma, el programa da la opción de crear un informe detallado del estudio que se ha realizado; incluyendo los datos individuales, materiales y pasos de iteración de cada material utilizado, como se puede observar en las imágenes anteriormente mostradas.

CAPÍTULO 4.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de haber realizado la simulación de la configuración, se procedió a la recopilación de resultados y su discusión.

Como se indica en la sección 2.4, uno de los objetivos de la simulación realizada es presentar imágenes de detección de fallos en aislamiento, filtración, entre otros. Para detectar fallos en aislamiento, filtración; se requiere condiciones estacionarias, con ello se utiliza: temperatura, emisividad, radiación y convección que permite detectar cualquier variación en el material, obteniendo de esa manera un diagnóstico rápido, y aplicarlo en inspecciones interiores o exteriores.

El análisis realizado es válido para condiciones estacionarias (cámara termográfica) y condiciones transitorias (simulación); con iteraciones largas e incertidumbres elevadas dando como resultado las mejores mediciones de temperatura superficial en el sitio.

Por ello, en edificaciones se utiliza la termografía con aplicación principalmente cualitativa, como es el caso en estudio. Entre la diferencia de temperatura a través de la configuración y la variación entre las temperaturas del aire en el exterior e interior.

Los parámetros expuestos pueden estipular el tipo de medición termográfica a realizarse, definiéndose dos tipos principales: la termografía cualitativa, la cual se fundamenta en la localización de gradientes térmicos anómalos en el momento de inspección, comparándolo con elementos semejantes en la misma condición. Una medición cuantitativa se fundamenta en valorizar los valores potenciales localizados, donde los parámetros anteriormente mencionados no tienen tanta influencia, ya que no se busca una medida exacta de temperatura. (FLIR Systems, 2011)

La coloración, sea esta máxima (color rojo) o mínima (color azul) no significa que la configuración se encuentre a alta o baja temperatura, más bien da la pauta de

que hay una diferencia de temperatura y permite realizar un análisis para determinar las posibles fallas o defectos que se encuentren en la configuración.

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para un elemento de la configuración analizada. Este elemento corresponde a un Ladrillo, por su volumen y predominancia en la configuración.

Se escogió el método nodal, ya que permite analizar en un determinado punto del volumen del ladrillo la temperatura en función del tiempo, asemejando este cálculo al que realiza el software de simulación.

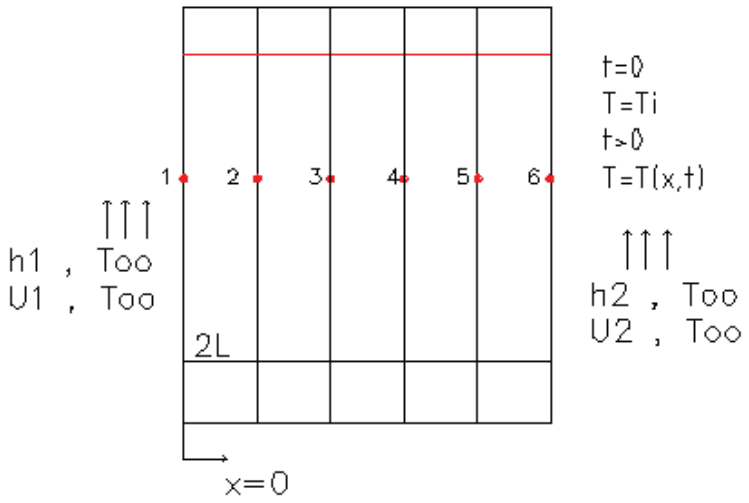


Figura 4-1 Modelo matemático del ladrillo.
Fuente: Propia.

Datos:

- Dimensión del ladrillo: $240\ x\ 140\ x\ 100\ mm$
- $L = espesor\ del\ ladrillo = 100\ mm;\ T_{\infty 1} =\ 20°C$
- $k = 4{,}5\ \frac{w}{m\ °C}$
- $\rho = 4900\ \frac{kg}{m^3}$
- $Cp = 800\ \frac{J}{kg\ °C}$
- $h_1 =\ Conv. + Rad.;\ h_2 = 10\ \frac{w}{m^{2°}K} = Aire$
- $p = 6\ nodos$
- $\varepsilon = 0{,}8$
- $\sigma =\ 5{,}67E - 8$

Solución:

$$h_{rad} = \varepsilon\, \sigma \left(\frac{{T_{s*}}^4 - {T_{alrededores}}^4}{T_{s*} - T_{alrededores}} \right)$$

$$h_{rad} = 0{,}8 * 5{,}67E - 8 * \left(\frac{307^4 - 292^4}{307 - 292} \right) = 4{,}88 \ \frac{w}{m^{2\circ}K}$$

$$\therefore \ h_1 = \ h_{Conv} \ + h_{Rad} = 14{,}88 \ \frac{w}{m^{2\circ}K}$$

Fórmula para los 6 nodos:

1. $h_1 A_1 \left(T_{\infty 1} - {T_0}^P\right) - \frac{kA}{\Delta x} \left({T_0}^P - {T_1}^P\right) = \rho\, A\, \frac{\Delta x}{2}\, C_p\, \frac{({T_0}^{P+1} - {T_0}^P)}{\Delta t_0}$
2. $\frac{kA}{\Delta x} \left({T_0}^P - {T_1}^P\right) - \frac{kA}{\Delta x} \left({T_1}^P - {T_2}^P\right) = \rho\, A\, \Delta x\, C_p \frac{({T_1}^{P+1} - {T_1}^P)}{\Delta t_1}$
3. $\frac{kA}{\Delta x}\left({T_1}^P - {T_2}^P\right) - \frac{kA}{\Delta x} \left({T_2}^P - {T_3}^P\right) = \rho\, A\, \Delta x\, C_p \frac{({T_2}^{P+1} - {T_2}^P)}{\Delta t_2}$
4. $\frac{kA}{\Delta x}\left({T_2}^P - {T_3}^P\right) - \frac{kA}{\Delta x} \left({T_3}^P - {T_4}^P\right) = \rho\, A\, \Delta x\, C_p \frac{({T_3}^{P+1} - {T_3}^P)}{\Delta t_3}$
5. $\frac{kA}{\Delta x}\left({T_3}^P - {T_4}^P\right) - \frac{kA}{\Delta x} \left({T_4}^P - {T_5}^P\right) = \rho\, A\, \Delta x\, C_p \frac{({T_4}^{P+1} - {T_4}^P)}{\Delta t_4}$
6. $\frac{kA}{\Delta x} \left({T_4}^P - {T_5}^P\right) - h_2\, A\, ({T_5}^p - T_{\infty 2}) = \rho\, A\, \frac{\Delta x}{2}\, C_p\, \frac{({T_5}^{P+1} - {T_5}^P)}{\Delta t_5}$

Despejando la temperatura T^{P+1} en cada ecuación, se obtiene:

1. ${T_0}^{P+1} = \left[1 - \left(\frac{2h}{\Delta x\, \rho\ C_p} + \frac{2}{\Delta x^2}\, \frac{k}{\rho\ C_p}\right) \Delta t_0 \right] {T_0}^P + \left(\frac{2}{\Delta x}\, \frac{k}{\rho\ C_p} T_{\infty 1} + \frac{2}{\Delta x^2}\, \frac{k}{\rho\ C_p}\, {T_1}^P \right) \Delta t_0$
2. ${T_1}^{P+1} = \frac{1}{\Delta x^2}\, \frac{k}{\rho\ C_p}\, \Delta t_1 \left({T_0}^P - {T_2}^P\right) + \left(1 - \frac{2}{\Delta x^2}\, \frac{k}{\rho\ C_p}\, \Delta t_1\right) {T_1}^P$
3. ${T_2}^{P+1} = \frac{1}{\Delta x^2}\, \frac{k}{\rho\ C_p}\, \Delta t_2 \left({T_1}^P - {T_3}^P\right) + \left(1 - \frac{2}{\Delta x^2}\, \frac{k}{\rho\ C_p}\, \Delta t_2\right) {T_2}^P$
4. ${T_3}^{P+1} = \frac{1}{\Delta x^2}\, \frac{k}{\rho\ C_p}\, \Delta t_3 \left({T_2}^P - {T_4}^P\right) + \left(1 - \frac{2}{\Delta x^2}\, \frac{k}{\rho\ C_p}\, \Delta t_1\right) {T_3}^P$
5. ${T_4}^{P+1} = \frac{1}{\Delta x^2}\, \frac{k}{\rho\ C_p}\, \Delta t_4 \left({T_3}^P - {T_5}^P\right) + \left(1 - \frac{2}{\Delta x^2}\, \frac{k}{\rho\ C_p}\, \Delta t_4\right) {T_4}^P$
6. ${T_5}^{P+1} = \left[\left(\frac{2h}{\Delta x\, \rho\ C_p} + \frac{2}{\Delta x^2}\, \frac{k}{\rho\ C_p}\right) \Delta t_5 - 1 \right] {T_5}^P + \left(\frac{2}{\Delta x}\, \frac{k}{\rho\ C_p} T_{\infty 2} + \frac{2}{\Delta x^2}\, \frac{k}{\rho\ C_p}\, {T_4}^P \right) \Delta t_5$

Calculando las constantes α, M y N se obtiene:

$$\alpha = \frac{k}{\rho\ C_p} = 1{,}14x10^{-6}$$

$$M = \left(\frac{2}{\Delta x^2}\right)\alpha = \left(\frac{2}{(2x10^{-3})^2}\right)(1{,}14x10^{-6}) = 0{,}57$$

$$N = \left(\frac{1}{\Delta x^2}\right)\alpha = \left(\frac{1}{(2x10^{-3})^2}\right)(1{,}14x10^{-6}) = 0{,}285$$

$$Q = \left(\frac{2h}{\Delta x\ k}\right)\alpha = \frac{2(10)}{(2x10^{-3})(4{,}5)} = 0{,}0025$$

$$\Delta t_0 = \Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \Delta t_4 = \frac{1}{M} = \frac{1}{0{,}57} = 1{,}75$$

$$(1 - M\Delta t_i) \geq 0 \ \rightarrow\ \Delta t_i \ \leq \frac{1}{M}$$

$$\Delta t_i = \frac{1}{Q + M} = \frac{1}{0{,}0025 + 1{,}75} = 0{,}57$$

$$\therefore\ \Delta t = 0{,}57$$

Reemplazando las constantes en las ecuaciones despejadas se obtiene:

1. $T_0{}^{P+1} = 22{,}94 + 0{,}32T_1{}^P + 0{,}42T_0{}^P$
2. $T_1{}^{P+1} = 0{,}16\left(T_0{}^P - T_2{}^P\right) + 0{,}68T_1{}^P$
3. $T_2{}^{P+1} = 0{,}16\left(T_1{}^P - T_3{}^P\right) + 0{,}68T_2{}^P$
4. $T_3{}^{P+1} = 0{,}16\left(T_2{}^P - T_4{}^P\right) + 0{,}68T_3{}^P$
5. $T_4{}^{P+1} = 0{,}16\left(T_3{}^P - T_5{}^P\right) + 0{,}68T_4{}^P$
6. $T_5{}^{P+1} = 5{,}17 + 0{,}32T_4{}^P + 0{,}42T_5{}^P$

Tabla 4-1 Datos obtenidos de las fórmulas de temperatura (°*C*) en excel.

Pto	*t(s)*	*To °C*	*T1 °C*	*T2 °C*	*T3 °C*	*T4 °C*	*T5 °C*
0	0,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
1	0,50	42,18	17,68	17,68	17,68	17,68	24,41
2	1,00	46,31	15,94	12,02	12,02	12,02	21,08
3	1,50	47,49	16,33	8,80	8,18	8,18	17,87
4	2,00	48,11	17,29	7,29	5,66	5,66	15,29
5	2,50	48,68	18,29	6,82	4,11	4,11	13,40
6	3,00	49,24	19,14	6,91	3,23	3,23	12,11
7	3,50	49,74	19,79	7,24	2,78	2,78	11,29
8	4,00	50,16	20,25	7,64	2,61	2,61	10,80
9	4,50	50,49	20,58	8,02	2,58	2,58	10,54
10	5,00	50,73	20,79	8,33	2,62	2,62	10,42

Fuente: Propia

La figura 4-2 (excel) y figura 4-3 (ANSYS) muestran la variación que existe entre la Temperatura (°*C*) vs. tiempo (seg.).

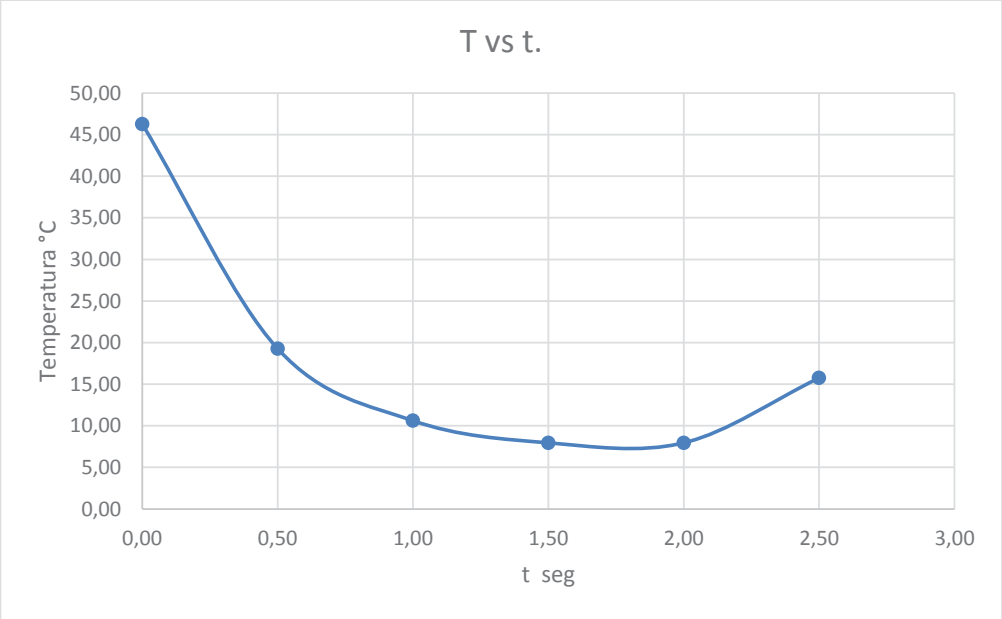


Figura 4-2 T vs. t (excel).
Fuente: Propia.

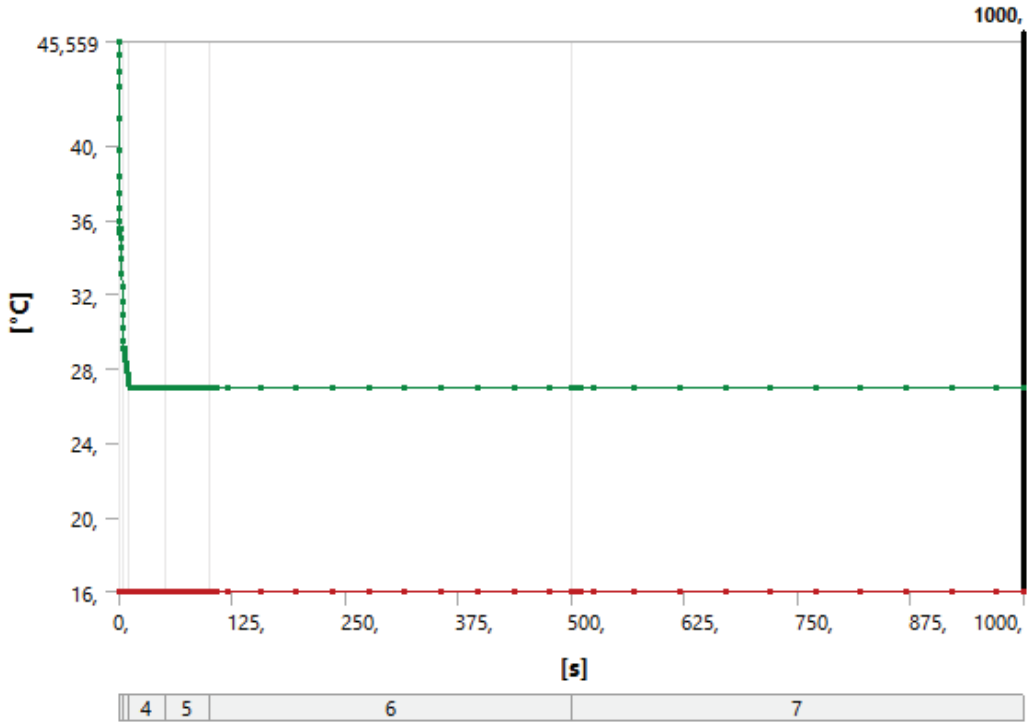


Figura 4-3 T vs. t (ANSYS).
Fuente: Propia

La gráfica presenta una tendencia similar a la obtenida en el software de simulación. El intervalo de tiempo realizado para el cálculo matemático es limitado en relación a los realizados por el software (análisis nodal); como se analizó en el capítulo anterior. Con ello se corrobora que las iteraciones realizadas por el programa son las correctas.

Este análisis lo realiza ANSYS para cada elemento definido, cuyos resultados se analizan en el siguiente punto.

4.1 CONFIGURACIÓN ANALIZADA

Para el análisis se utilizaron imágenes tomadas como referencia de la cámara termográfica marca MILWAUKEE (**Anexo 1 – Características Cámara Termográfica MILWAUKEE**)

Se analizó de manera independiente la imagen tomada por la cámara y la simulación realizada; posterior a este análisis se consideran los defectos más

representativos que se pueden presentar en dicha configuración (filtraciones, fugas y grietas).

Por medio de un análisis comparativo cualitativo y cuantitativo entre las zonas analizadas y defectos encontrados.

- **Análisis Cualitativo. -** es el primer análisis que se realiza, donde se observa las anomalías o defectos de distinta magnitud para localizarlos y evaluarlos según su nivel de gravedad. Con ello se trata de manera rápida buscar aquello que se aparta de lo normal para el objeto de estudio, basado en la configuración seleccionada.
- **Análisis Cuantitativo. -** por medio de este análisis se determina las temperatura o temperaturas que son de mayor relevancia para un análisis concreto; y a partir de estas extraer las conclusiones detectadas y las soluciones a adoptar.

Después de realizar los dos análisis, se emite un criterio de lo observado en las imágenes analizadas para que posteriormente se den soluciones a las fallas o anomalías que se presenten dentro de la configuración.

A continuación se presenta, comparaciones que existen entre la imagen termográfica tomada como referencia e imágenes simuladas con el software de elementos finitos. Como son:

- *Pared sin anomalías.-* se refiere a la pared tomada como referencia en este estudio.
- *Pared con defectos de hermeticidad.-* se toma una pared que contiene entradas de aire entre las uniones entre los ladrillos, con los parámetros establecidos anteriormente; incluido en este caso el aire que circula por la misma.
- *Pared con filtraciones de agua.-* se incluye en la configuración elementos que simulen entrada de agua (filtraciones); para observar su comportamiento.
- *Pared con grietas y agujeros.-* se toma ligeros cambios estructurales en la configuración simulada que equivalen a este tipo de defecto.

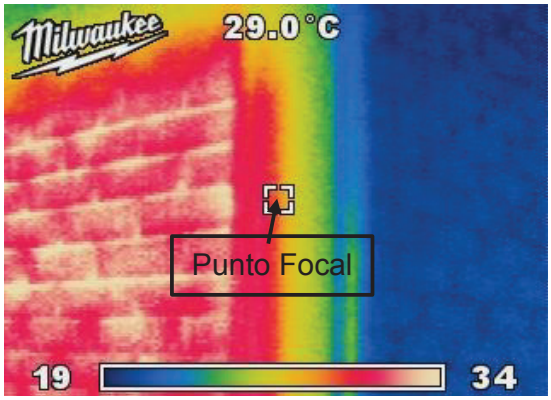


Figura 4-4 Imagen termográfica.
Fuente: Propia

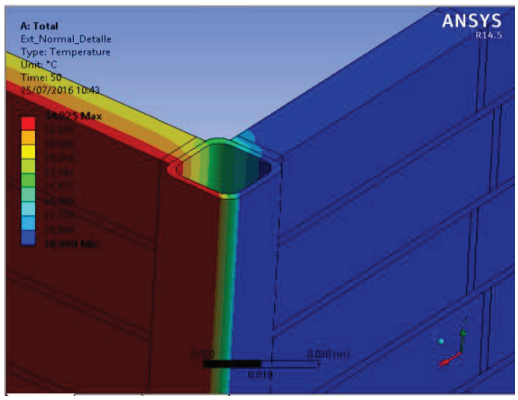


Figura 4-5 Imagen simulada.
Fuente: Propia

ANÁLISIS:

Las *figuras 4-4 y 4-5*, muestran las variaciones de temperatura de la configuración analizada; se tomó como referencia las temperaturas máximas y mínimas de la *figura 4-4*, para realizar la simulación. Se consideró de igual manera la emisividad de cada material, que la cámara proporciona dando como resultado, lo siguiente:

La simulación térmica y las fotografías termográficas son similares. Debido a que la cámara toma fotos en un instante de tiempo, la variación de temperatura cambia en cualquier intervalo, dependiendo de la referencia que se toma como punto focal del encuadre de la imagen. La simulación, por otro lado, realizada en estado transitorio, genera un gradiente de temperatura en función de tiempo; que es equivalente a los resultados obtenidos con la cámara termográfica. Por esta razón se evidencia una ligera variación en la temperatura que se observa en las *figuras 4-4 y 4-5*.

Un factor importante a considerar son las condiciones ambientales (velocidad del viento) como se observa en la imagen termográfica (*figura 4-4*) con una Tmáx = 34°C y Tmín = 19 °C. Mientras que en la simulación (*figura 4-5*) siendo un escenario ideal presenta una Tmáx = 26 °C y Tmín = 16 °C; generando un margen de error aceptable dentro de las variaciones de temperatura. En conclusión, la simulación (*figura 4-4*) es equivalente a la imagen termográfica (*figura 4-5*) por lo descrito.

4.2 HERMETICIDAD

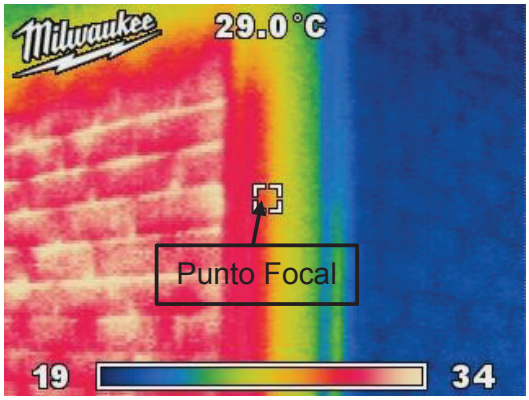


Figura 4-6 Imagen termográfica.
Fuente: Propia

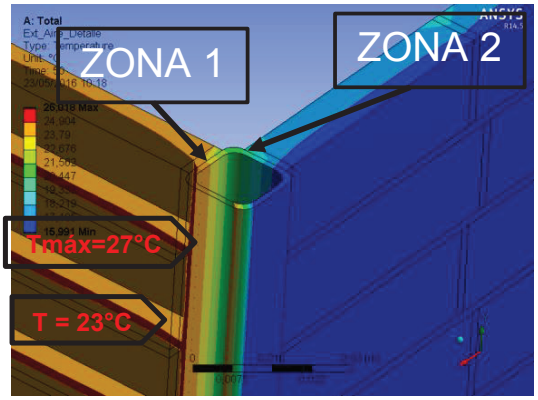


Figura 4-7 Imagen simulada.
Fuente: Propia

ANÁLISIS:

Cuando en la configuración existen pequeñas entradas de aire, sean estas por falta de hermeticidad (ventanas) o por falta de material. Se observa una disminución brusca de temperatura; esto se debe a que entre los materiales en contacto no existe la correcta unión, lo que provoca que el aire filtre a través de los mismos.

La configuración (*figura 4-6*) no posee defectos por falta de hermeticidad; en la zona 1 *(figura 4-7*), la configuración tiene una disminución de temperatura donde Tmáx = 27 °C; que es la que se encuentra entre la unión de la viga y el cemento en la que incide radiación solar directamente. En la zona 2 (*figura 4-7*) se evidencia una mayor filtración de aire ya que este lado de la configuración no tiene contacto con el sol. Cabe recalcar que el análisis realizado es superficial.

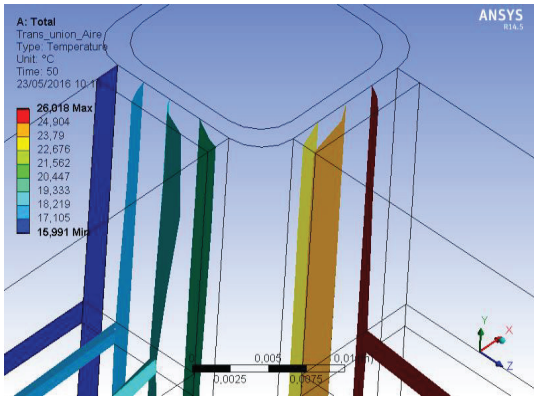


Figura 4-8 Transferencia por capas.
Fuente: Propia

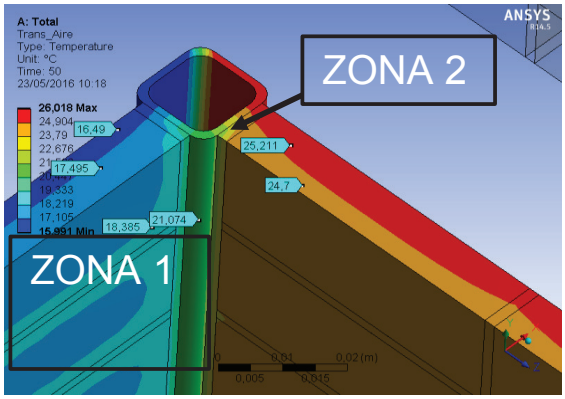


Figura 4-9 Análisis interno.
Fuente: Propia

ANÁLISIS:

En la parte interna de la configuración, se observa la transferencia de calor que se generaría si la misma presentara un problema por filtración de aire; se nota que, al existir este defecto, hay una disminución en la temperatura (*figura 4-9*) con Tmáx = 25 °C y Tmín = 17 °C, lo que provoca que no haya una temperatura de confort dentro de la misma configuración. Se observa claramente que la parte con mayor probabilidad de ingreso de aire seria la *zona 1* (área Interna sin contacto con el sol); mientras que la *zona 2* (área de contacto directo con el sol) la mayor parte de ingreso es la zona donde se encuentra en contacto con la viga. Debido a que el sol calienta el aire dependiendo de su posición en la que se encuentre.

La transferencia por capas (*figura 4-8*), permite tener de manera más detallada el intercambio de calor que existe entre los elementos de la configuración; cuando existe falta de hermeticidad, se pude determinar en qué parte se encuentra la filtración y llegar a identificar de manera más rápida y directa el defecto.

4.3 FILTRACIÓN DE AGUA

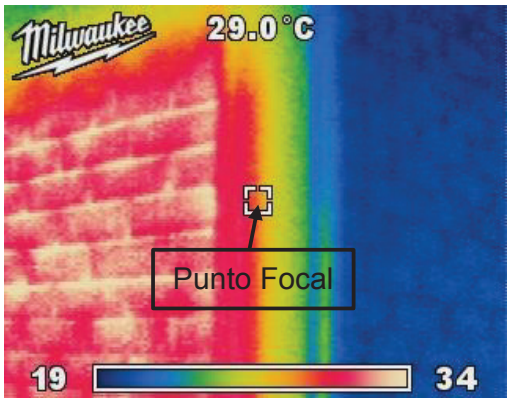


Figura 4-10 Imagen termográfica.
Fuente: Propia

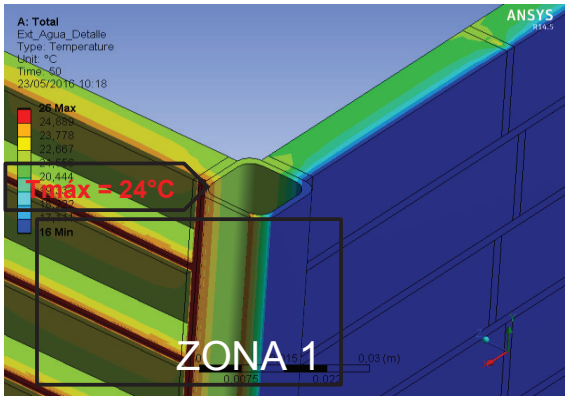


Figura 4-11 Imagen simulación.
Fuente: Propia

ANÁLISIS:

Cuando existen pequeñas filtraciones de agua (humedad) sean estas por: lluvia, agentes externos (limpieza con agua), rotura de tubería, se observa una disminución brusca de temperatura (*figura 4-11*); esto se debe a que los materiales están en contacto directo con el agua, mismo que es absorbido por estos, causando la variación de temperatura mostrada en la *zona* 1.

La configuración (*figura 4-10)* no posee defectos por filtración de agua; en la *zona 1* (*figura 4-11*), la configuración tiene una disminución de temperatura donde Tmáx = 25 °C; que es la que se encuentra entre la unión del cemento y el ladrillo en la que incide radiación solar directamente, esta se genera cuando el agua interactúa con el medio y la configuración produciendo el intercambio de calor observado (*figura 4-11*).

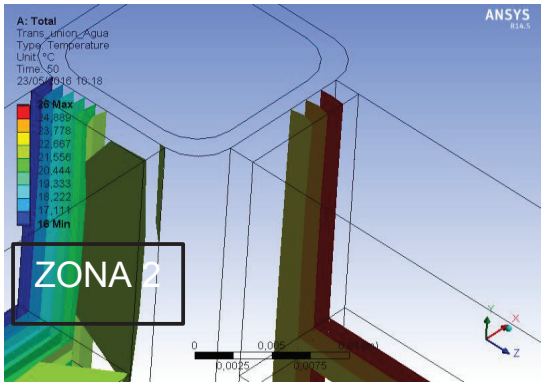


Figura 4-12 Transferencia por capas.
Fuente: Propia

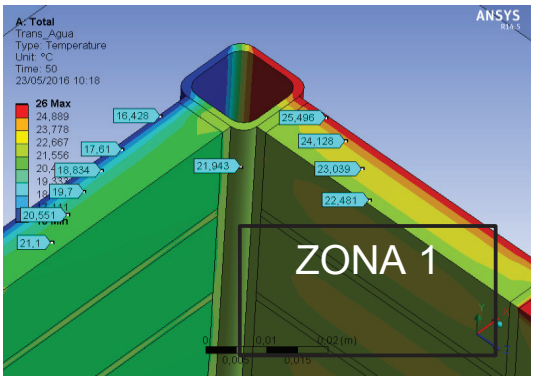


Figura 4-13 Análisis interno.
Fuente: Propia

ANÁLISIS:

En la parte interna de la configuración, se observa la transferencia de calor que se generaría si la misma presentara un problema por humedad; se nota que al existir este defecto, hay una disminución en la temperatura (*figura 4-13*) con Tmáx = 25°C y Tmín = 16 °C, provocando un daño evidenciado en la *zona 1* (ladrillo), porque siendo un material poroso absorbe con mayor facilidad el agua.

La transferencia por capas (*figura 4-12*); como se observa en la *zona 2*, esta permite una visualización más detallada de lo que ocurre internamente en la configuración, evidenciando una mayor variación de temperatura en la parte donde el sol no irradia directamente.

4.4 GRIETAS

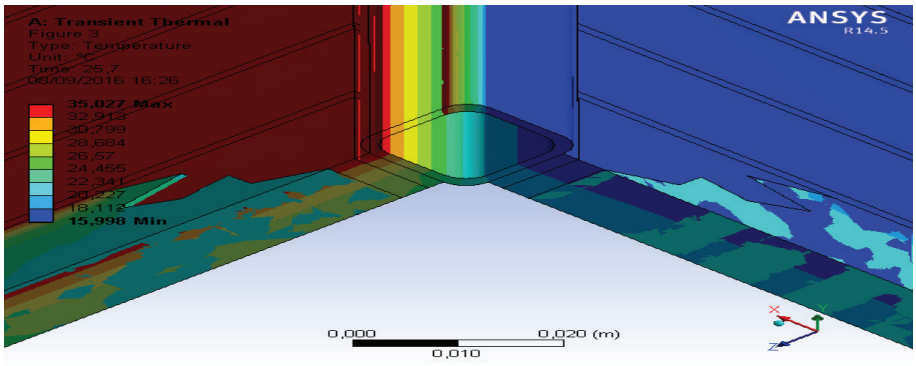


Figura 4-14 Imagen Simulada.
Fuente: Propia.

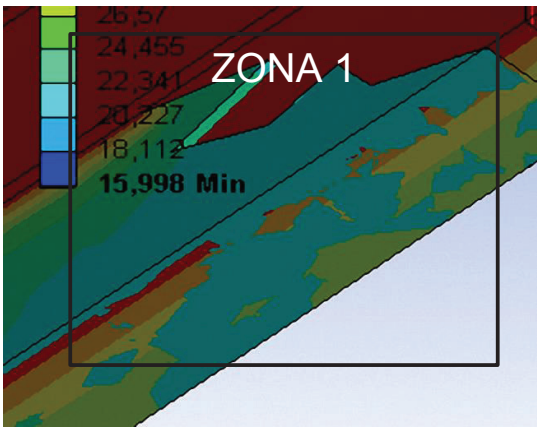


Figura 4-15 Grieta (Zona 1).
Fuente: Propia

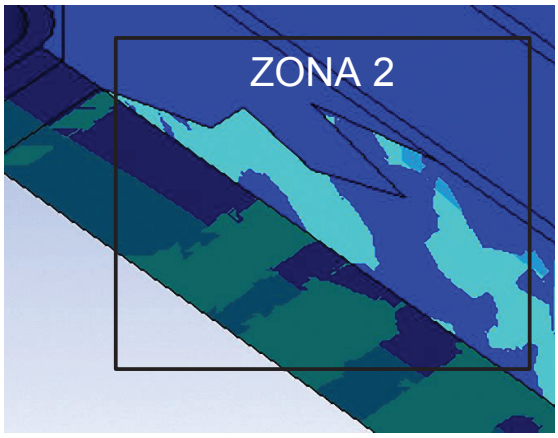


Figura 4-16 Grieta (Zona 2).
Fuente: Propia

ANÁLISIS:

Cuando en la configuración existen grietas o perforaciones (figura 4-14) sean estas por: taladro, desgaste natural de los elementos, agentes externos (sismo o terremotos), la temperatura es absorbida de igual manera por los defectos descritos notándose una variación; principalmente en la superficie donde existen grietas; esto se debe a que la radiación (emisividad) toma a estos defectos como dos cuerpos diferentes en contacto; generando transferencia de calor al interior a través del defecto.

En la zona 1, hay una transferencia de calor más amplia debido a que la cara está expuesta directamente al sol, con una temperatura que varía de T= 20°C a 30°C (figura 4-15); mientras que la zona 2 presenta una transferencia de calor menor con una temperatura de T=20°C (figura 4-16).

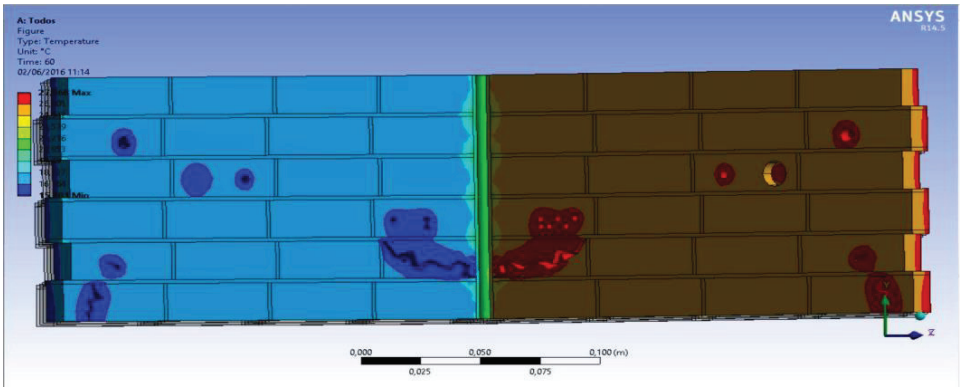


Figura 4-17 Análisis interno total.
Fuente: Propia

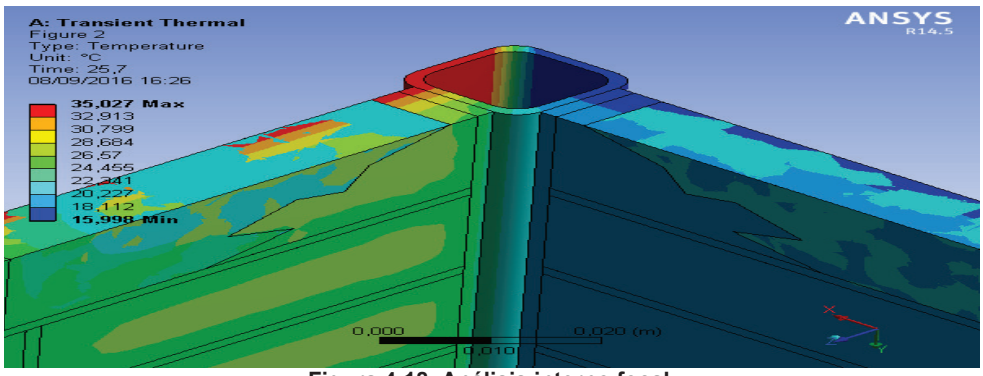


Figura 4-18 Análisis interno focal.
Fuente: Propia

ANÁLISIS:

En la parte interna de la configuración (*figuras 4-16 y 4-17*), se observa la transferencia total de calor que se genera; se nota que al existir grietas o perforaciones el intercambio de calor no es uniforme, alrededor de estos defectos se acota una concentración considerable de temperatura generando posibles filtraciones mucho más grandes de aire o agua, o a su vez mas ingreso de calor provocando que no exista una estabilidad en el confort.

Si no se toma las adecuadas correcciones como son el resanado de la configuración o el cambio de elementos por unos nuevos, el problema puede llegar a ser irreparable teniendo como consecuencia el cambio total de la configuración.

Para una mejor apreciación de la simulación del defecto con agujero ver **Anexo 3 – Simulación de un ladrillo con agujeros.**

CAPÍTULO 5.

CONSIDERACIONES DE UN PROCEDIMIENTO GENERAL DE INSPECCIÓN

El primer paso a considerar para un correcto análisis es definir la tarea; es decir entrevistar al cliente sobre las condiciones del edificio. Después de determinar la temperatura tanto del exterior como el interior y asegurar la variación de temperatura para la inspección (se sugiere un intervalo mínimo de 10°C). Posterior a esto, comenzar el análisis por el exterior, de esta manera se localizará de manera eficiente los puentes térmicos o la falta de aislamiento y comparar el resultado con las imágenes que muestren fallos para analizar el grado de las distintas complicaciones encontradas.

El próximo paso es observar el ambiente desde el interior, el inspector toma medidas para afirmar un resultado más exacto, se considera:

- Para que las propiedades aislantes de los muebles no incidan en las lecturas de las cámaras, sacar el mobiliario de las paredes exteriores y cortinas; mínimo seis horas antes.
- Un intervalo mínimo de 10°C entre la temperatura del interior y exterior.
- Escanear cada zona del edificio, y tomar notas para un registro más detallado (lugar exacto donde se tomó la fotografía). (FLIR Systems, 2011)

Siendo una técnica no intrusiva, sin necesidad de contacto directo con la superficie, permite identificar una diferencia de temperaturas de todos los puntos de la superficie de análisis. Recalcando en edificación el hecho de no perjudicar la configuración en la identificación de un problema.

Otro factor importante a ser considerado, es la revisión de las condiciones ambientales por factores climáticos (carga solar, viento, lluvia, entre otros) sean lo más mínimas en lo posible.

Algunos puntos a tomar en cuenta para una cámara termográfica son:

1. Brinde resultados precisos y exactos, además de reproducibles.

2. Con detector de alta resolución (que se pueda cambiar por otros) y calidad de imagen.
3. Mantenimiento correctivo rápido (sustituir la batería gastada por una nueva
4. Que proporcione imágenes en formato JPEG (de buen pixelaje).
5. Ergonómica para un uso extenso o habitual
6. Que incorpore una cámara visual con un iluminador de objetivo integrado
7. Con servicios de actualización de software
8. Con adecuada capacidad de fusión de imagen
9. Con un amplio rango de temperatura
10. Que presente facilidad para distintas configuraciones
11. Que posea un fabricante con servicio postventa, soporte técnico, y formación certificada.

5.1 CAPTACIÓN DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS.

Con referencia de las imágenes tomadas con la cámara termográfica se presenta consideraciones para tomar las imágenes de una mejor manera.

- **Encuadre de la imagen:** manteniendo una distancia segura, donde se pueda presentar la imagen que entrega la mayor información y visibilidad del objeto u objetos a analizar.
- **Enfoque:** la lente de la cámara debe estar totalmente limpia, evitando medias erróneas e imágenes desenfocadas.
- **Ajuste del rango de temperatura:** de ser necesario se fijan rangos de temperaturas posicionando el área de análisis.
- **Cuidado con las condiciones meteorológicas:** elegir las condiciones más óptimas, al igual que la hora en que se tome la fotografía; influye en los resultados, esto es irrelevante si la inspección es realizada en el interior donde las condiciones ambientales no afectan.

5.2 INFORME

Para su correcta interpretación se usará un punto comparativo entre uno en condiciones normales y un punto crítico o caliente, para lo cual se considera la nomenclatura siguiente:

T_{PC}= Temperatura de punto caliente o de punto crítico (° C)

T_{CN}= Temperatura equivalente en condiciones de trabajo (° C)

Como medida del análisis; se ubica de igual manera un rango aproximado para llegar a las conclusiones detalladas a continuación, tomando en cuenta que para cada análisis no es definitivo:

- $T_{PC} - T_{CN} \leq 10°C \rightarrow$ Notabilidad temperatura **normal**
- $10°C < T_{PC} - T_{CN} \leq 25°C \rightarrow$ Notabilidad temperatura **leve**
- $25°C < T_{PC} - T_{CN} \leq 50°C \rightarrow$ Notabilidad temperatura **grave**
- $50°C < T_{PC} - T_{CN} \leq 70°C \rightarrow$ Notabilidad temperatura **crítica**
- $T_{PC} - T_{CN} > 70 °C \rightarrow$ Notabilidad temperatura **muy crítica**

Se necesita comparar temperaturas de elementos conformados por el mismo material, ya que cada material tiene emisividad diferente.

Una vez valorados los aspectos nombrados se lleva a cabo la actuación que se desea realizar en función de la urgencia del mismo, es decir de menor a mayor urgencia:

- **Siguiente mantenimiento predictivo:** No se necesita realizar ninguna acción hasta el siguiente estudio o mantenimiento predictivo.
- **Seguimiento:** Realizar un seguimiento para observar el avance del punto caliente o crítico usando el personal y metodología; dependiendo de la gravedad de la falla.
- **Lo antes posible:** Actuar lo antes posible teniendo en cuenta el proceso analizado en cada institución o empresa, de ser necesario se realizará el paro inmediato para reparar el problema.
- **Urgente:** Evaluar la posibilidad de detener el proceso para reparar el problema.
- **Muy urgente:** Interrumpir el proceso inmediatamente para reparar el problema.

Como se especifica en los casos últimos se evaluará el problema para la aplicación de una medida correctiva, antes de que el problema sea más grave.

Finalmente, la documentación de la inspección consta de:

- Fotografías tomadas durante la inspección.
- Información de cada captación (Lugar, Hora, Fecha).
- Copia de cada una de las captaciones infrarrojas (variación de temperatura) y visibles (Imagen real).
- Informe detallado, junto con una copia en formato digital.

5.3 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA REALIZAR UN ANÁLISIS TERMOGRÁFICO

5.3.1 ALCANCE

Cubre los requerimientos generales y específicos para la realización del procedimiento de inspección termográfica correspondientes a defectos estructurales.

La elaboración de un procedimiento general de inspección termográfico debe ser considerado como una condición única, siguiendo las directivas específicas de esta sección. La utilización de un procedimiento general de inspección termográfico deberá ser acordado; a través de los documentos de contrato y del ingeniero responsable.

Todo procedimiento general de inspección termográfico, deberá ser escrito y es considerado para este estudio como un documento de ingeniería y/o fabricación.

5.3.2 FORMATO

El modelo del formato de análisis por ensayo termográfico (se detalla en el **Anexo 4 - Formato de especificaciones de modelo ensayo termográfico**); con los contenidos necesarios para la elaboración del procedimiento general de inspección termográfico.

Todo procedimiento general de inspección termográfico, deberá ser desarrollado de acuerdo a los requerimientos generales y particulares de esta sección, no obstante todos estos requerimientos pueden ser aplicados o servir de guía a un procedimiento de inspección más complejo.

5.3.3 CONSIDERACIONES DE LA CÁMARA TERMOGRÁFICA

La cámara debe responder a las necesidades de la inspección, no es necesario obtener una cámara con altos beneficios que no se vayan a utilizar o aprovechar.

Para evitar la saturación de la cámara, evitar que la misma absorba as radiación de la necesaria, es decir que no aporta información.

Si la entidad de estudio está a una temperatura mayor al rango elegido, la imagen saturada no proveerá la información requerida. La cámara permite controlar el rango a partir de las funciones del menú, sin embargo, a manera general no trabajan en varios rangos.

El rango depende de la cámara utilizada, generalmente este se encuentra entre*:*

- *-10°C a 50°C de funcionamiento*
- *-25°C a 60°C de almacenamiento*
- *-10°C a 350°C de elementos puntuales.* (Milwaukee, 2015)

Conjuntamente con estos parámetros, las cámaras térmicas tienen otras funciones útiles para el termógrafo: el punto focal (marca una zona concreta de la imagen). Dependiendo de la cámara, este podrá ser fijo o móvil e incluso se podrán colocar varios puntos de medida.

- *El punto frio y punto caliente,* es mostrado en la imagen en tiempo real.
- *El área de medidas* se podrá especificar un área en la imagen y observar el punto más frio y más caliente de esa área y la temperatura media.
- *La isoterma* es de gran utilidad para resaltar partes de la imagen con igual temperatura, estableciendo un mismo color.
- *Diferentes alarmas* que son utilizadas para revelar ausencias de aislamiento.
- *La fusión térmica y la función de imagen en imagen,* con otras herramientas se pueden fusionar las imágenes digital y térmica en una misma imagen.

5.3.4 ANÁLISIS TERMOGRÁFICO

El análisis termográfico permite descubrir puntos críticos de pérdidas de energía en edificaciones:

1. Detección de deficiencias en el envolvente de la estructura
    - Comprobar el estado del aislamiento (falta de material aislante, ejecución incorrecta en obra, etc.).
    - Localizar infiltraciones de aire.
    - Identificar fugas de calor.
    - Detectar puentes térmicos (en cercos de ventana, cantos de forjados, etc.).
2. Supervisión del funcionamiento de instalaciones
    - Calefacción y refrigeración.
    - Electricidad.
    - Informática.
3. Detectar aislamiento inadecuado.
4. Identificar los puntos más críticos, donde se requiera mayor cuidado.
5. Calcular las áreas de los elementos analizados.
6. Ubicar de manera adecuada la temperatura máxima y mínima.
7. Ubicar el rango de temperatura en base a la criticidad dada anteriormente.
8. Entregar una interpretación para cada punto crítico y zona analizada.
9. Reportar las condiciones que han sido identificadas de la configuración analizada.

Se considera importante, que el rendimiento de una industria crezca en función de que se reduzcan las fallas en los materiales de una forma sustentable en el tiempo. Para conseguir lo anterior, es indispensable tener un plan de mantenimiento apropiado y con personal que se capacite constantemente; tanto en uso de técnicas de análisis y diagnóstico de fallas efectuadas, así como obtener conocimiento suficiente sobre las características de funcionamiento y diseño de la maquinaria.

5.3.5 EJEMPLO DE ANÁLISIS DE CONFIGURACIONES REALIZADAS

- **Anexo 5 – Ejemplo 1**
- **Anexo 6 – Ejemplo 2**
- **Anexo 7 – Ejemplo 3**

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Por medio de la cámara se pudo obtener imágenes que entregan propiedades de emisividad que son transformadas a una variación de temperatura. La imagen tomada es termográfica; mientras que la simulación es un análisis térmico que nos muestra la transferencia de calor que se da a través de la configuración; corroborando de esta manera que la imagen termográfica tomada como referencia es equivalente al estudio que se realizó en la simulación con los diferentes parámetros expuestos (temperatura, emisividad, radiación, convección y conducción).

En la configuración analizada, la mayor variación de temperatura es en la viga de acero, donde se alcanza una temperatura máxima de 35 °C debido a sus propiedades térmicas. Por otro lado, el ladrillo al ser un material refractario, resiste a altas temperaturas y posee una baja conductividad térmica con ello mantiene la temperatura mínima de 16 °C.

La imagen térmica se analiza en conjunto, por lo que las anomalías o defectos no tienen que conllevar una temperatura alta. Por lo tanto, las temperaturas que presentan una coloración roja (máxima) o una coloración azul (mínima), no quiere decir que sea un defecto que requiera mayor análisis, solamente es una temperatura que se toma como referencia dentro del rango establecido.

El ángulo con que se toma la imagen, el enfoque, la posición respecto al objeto, los reflejos, influyen en el diagnóstico ya que pueden generar imágenes que proporcionen información errónea; como por ejemplo imágenes mal contrastadas, imágenes con rango de temperatura no definido, elementos sometidos a vibraciones por agentes externos (ruido).

Se necesita de un software de elementos finitos que proporcione lo necesario para un análisis completo al momento de simular termografía, como: formato de importación, mallado, emisividad, convección, radiación, temperatura. Además, el

modelo debe ser realizado en el software de diseño correctamente, evitando problemas de agrupación entre los elementos en contacto y dificultades en el mallado.

A través de la simulación se puede generar un conjunto de imágenes como base de datos para los posibles defectos que se pueden encontrar dentro de una configuración de materiales, haciendo posible una rápida interpretación de las imágenes obtenidas por una cámara termográfica. Mediante la resolución del informe se podrá dar una interpretación correcta de dichas imágenes ayudando de esa manera a tener un diagnóstico más acertado.

6.2 RECOMENDACIONES

Durante la importación del diseño al software cuidar que los parámetros sean introducidos y no sean los predeterminados ya que pueden generar información errónea para rangos de temperatura, de esta manera se puede analizar configuraciones de carácter térmico.

Cuando se presentan configuraciones con diferentes materiales, la emisividad ayuda de manera conveniente, ya que se posee valores tabulados para cada material, lo que ayuda al estudio de la simulación.

Una selección adecuada del rango de temperatura es fundamental para recopilar la mayor información posible que se obtenga de la imagen analizada, y formará parte del informe.

Al momento de realizar la importación de modelos externos; tomar en cuenta la correcta selección de los materiales con sus respectivas propiedades mecánicas y térmicas.

Para una simulación adecuada, la computadora a utilizar debe tener una memoria RAM de elevada capacidad, ayudando a una compilación y ejecución de análisis más rápida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEJB. (2010). *Manual Introducción a los END*. Obtenido de http://www.dimf.upct.es/personal/jb_a/presentacion_end.pdf

Anish, P., & Tsuchin, P. C. (2012). Intelligent Nondestructive Testing Expert System for Aircraft Carbon/Carbon Composite Brakes Using Infrared Thermography and Air-coupled Ultrasound. *Materials Evaluations*, 1219-1229.

Arfaoui, A., Polodori, G., Taiar, R., & Popa, C. (2012). Infrared Thermography in Sports Activity. En R. Prakash, *Infrared Thermography* (págs. 141-168). Croacia: InTech.

Astarita, T., Cardone, G., & Carlomagno, G. (2006). Infrared thermography: An optical method in heat transfer and fluid flow visualisation. *Optics and lasers in engeneering*, 261-281.

Barreira, E., de Freitas, V., Delgado, J., & Ramos, N. (2012). Thermography Applications in the Study of Buildings Hygrothermal Behaviour. En R. Prakash, *Infrared Thermography* (págs. 171-192). Croacia: InTech.

Boritu, A., Anghel, V., Constantin, N., Gavan, M., & Pascu, A. (2011). Non-Destructive inspection of composite structures using active IR-thermography methods. *U.P.B.*, 1454-2358.

Bossi, R., Iddings, F., & Wheeler, G. (2002). *Radiographic testing. Amer Society for Nondestructive* (Vol. 4).

Carlomagno, G., & Cardone, G. (2010). Infrared thermography for convective heat transfer measurements. *Experiments in fluids*, 1187-1218.

Carrier Air Conditioning Company. (1980). *Manual de aire acondicionado.* Barcelona: Marcombo, S.A.

Cengel, Y. (2007). *Transferencia de Calor y Masa.* Mc.Graw-Hill Interamericana.

Cerdeira Pérez, F. (2008). *Desarrollo de nuevas técnicas de análisis no destructivo basadas en termografía infrarroja para su aplicación en la detección de falta de adherencia de aplcados en fracturas de edificios.* Vigo.

Constantin Murariu, A., Valentin Birdeanu, A., Cococaru, R., Safta, V. I., Dehelean, D., Botila, L., & Cuica, C. (2012). Application of Thermography in Materials Science and Engieering. En R. Prakash, *Infrared Thermography* (págs. 27-52). Romania: InTceh.

Cucurullo, G., Spingi, V., D´Agostino, V., Di giuda, R., & Senatore, A. (2012). Thermographic Inspection at the Interface of Dry Sliding Surfaces. En R. Prakash, *Infrared Thermography* (págs. 53-64). Croacia: Intech.

Díaz Regodón, M. I., & Tenorio Ríos, J. A. (2010). Pérdidas de calor y formaión de condensaciones en los puentes térmicos de los edificios. *1ras Jornadas de Investigación en Construcción*, 1131-1153.

es.scribd.com. (14 de Marzo de 2011). Obtenido de http://es.scribd.com/doc/50726320/AISLANTE-Y-MATERIALES-REFRACTARIOS-Traduccion#scribd

Fabricación, Dpto. de Ingeniería de materiales y fabricación. (2010). *www.dimf.upct.es.* Obtenido de http://www.dimf.upct.es/personal/JB_A/Presentacion_END.pdf

Filippin, C., & Flore Larsen, S. (2005). COMPORTAMIENTO TERMICO DE INVIERNO DE UNA VIVIENDA CONVENCIONAL EN CONDICIONES REALES DE USO. *ASADES*, 67-72.

FLIR Systems, A. (2011). Guía sobre termografía para aplicaciones en edificios y energía renovable. Madrid.

Fuchs, P. A., & Chase, S. B. (2010). Active Thermographic Coating Inspection System. *NDE/NDT for Highways and Bridges: Structural Materials Technology (SMT)*, 513-520.

García Gómez, S., de la Torre Moreno, A., & Sánchez López, J. (Marzo 2011). Prácticas externas del Máster de Innovación Tecnológica en la edificación.

Gonzáles Fernández, D. A. (19 de 12 de 2006). Contribuciones a las Técnicas No Destructivas para Evaluación y prueba de Procesos y Materiales basadas en Radiaciones Infrarrojas, Tesis Doctoral. Santander.

Grosse, C., & Ohtsu, M. (2008). Acoustic emission testing. *Springer Science & Business Media*.

Guerrero Mena, C. N. (2013). Evaluación de la Aplicabilidad de la Técnica de la Termografía Infrarroja al Reconocimiento del Estado de Elementos de Hormigón. Barcelona.

Halmshaw, R. (1989). *Introduction to Non-Destructive Testing.*

Hernández, A. (2002). "PREDISE" - Un novedoso y práctico programa de evaluación térmica. *ASADES*, 61-66.

Hidalgo García, R. (2015). Contribuciones al preprocesado, proceado y análisis en termografía infrarroja aplicados a ensayos no destructivos. Santander.

Hidalgo, R., J.R.A., López, J., & Madruga, F. (2013). Ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja. *AEND (Asociación española de ensayos no destructivos)*, 24-35.

Ibarra Castanedo, C. (2005). Quantitative Subsurface Defect Evaluation By Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval With The Phase. *Faculté Des Sciences Et De Génie, Université Laval.* Quebec.

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor.* México: PEARSON Educación.

Kremkau, F. (2001). Diagnostic ultrasound: principles and instruments.

López Rodríguez, G. (2010). Aplicación de la Termografía Infrarroja en la Evaluación No Destructiva de Estructuras de Madera. Valladolid.

Maldague, X. P. (2001). *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing.* Toronto: John Wiley & Sons, INC.

Milovanovi´c, B., & Banjad, I. (2008). The Role of Infrared Thermography in Nondestructive testing of Civil Engenieering Structures. Croacia.

Milwaukee. (2015). Manual del Operador M12 (160x120 Cámara Térmica).

Monroy, M. M. (10 de Noviembre de 1995). *Editorial.dca.ulpgc.es.* Obtenido de http://editorial.dca.ulpgc.es/ftp/ambiente/antesol/TESIS/cap3.pdf

Newman, J. (2006). Holographic and Shearographic NDT Applications in Aereospace Manufacturing. *Materials Evaluation*, 746-760.

Panas, A. (2012). IR Suport of Thermophysical Property Investigation - Study of Medical and Advanced Technology Materials. En R. Prakash, *Infrared Thermography* (págs. 75-90). Croacia: InTech.

Parlovic, A., & Barbaric, Z. (2013). Application of G100/120 Thermal Imaging Camera in Energy Efficiency Measuring in Building Construction. *SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING*, 153-164.

Peña, L. (2004). Cien años en la vida de la luz. México, D.F.: Fondo de la Cultura.

Portilla, A. (Septiembre de 2013). Apuntes de "Transferencia de Calor I". Quito, |: Escuela Politecnica Nacional.

REFLECTANTE, A. I. (Mayo de 2002). *http://www.rimainternational.org/.* Obtenido de http://www.rimainternational.org/pdf/handbook/sp.pdf

RIMA international. (Mayo de 2002). *Reflective Insulation Manufacturers Assiciation International (RIMA-I)*. Obtenido de http://www.rimainternational.org/pdf/handbook/sp.pdf

Ringermacher, H. I., Howard, D. R., & Knigth, B. (2008). Advances in Thermographic NDT at General Electric. *ASNT Research Symposium and Spring Conference*, 93-96.

Rodríguez González, C. (2012). *Sistema automatizado de detecci[on de defectos en piezas met[alicas mediante ensayos no destructivos con ultrasonidos.* Universidad de Cantabria.

Rodríguez Liñan, C., Morales Conde, M. J., Rubio de Hitta, P., & Pérez Gálvez, F. (2011). Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: oratorio San Felipe Neri (Cádiz). *Informes de la Construcción*, 13-22.

Rotolante, R., & McCabe, D. (2009). Lock-In Thermography: Fast, Easy to use NDT for a Wide Variety of Applications. *ASNT Fall Conference and Quality Testing Show*, 211-216.

Shih, J. K., Ming, H., Delpack, R., Hu, C. W., Plassmann, P., & Wawarzynek, M. K. (2000). Application of Infrared Thermography for Damage Detection in Structural Concrete a Preliminary Report. *NDT.net*.

Stelleta, C., Gianesella, M., Vencato, J., Fiore, E., & Morgante, M. (2012). Thermographic Applications in Veterinary Medicine. En R. Prakash, *Infrared Thermography* (págs. 117-141). Croacia: InTech.

Taylor, J., & Dupont, H. (1999). Thermographic Inspection of Metallic Honeycomb Sandwich Structures. *Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1373-1380.

Terres Peña, H. (Mayo de 2010). Termografía computacional para el análisis de falla utilizando el método del elemento frontera híbrido. México D.F.

Udpa, S., & Moore, P. (2004). *Electromagnetic testing.* American Society for Nondestructive Testing.

UKTA. (2009). *Thermography Code of Practice: Building Thermography.* UK: United Kindom Thermography Association UKTA.

Vega, J. (2011). *http://www.sld.cu/*. Obtenido de http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-fis/termoterapia_1.pdf

Villacís, A., & Villalba, D. (Octubre de 2011). Determinación de los sitios de inspección mediante elementos finitos, elaboración de la inspección con ensayos no destructivos y determinación del procedimiento para la certificación de los silos de la empresa BJ Services Ecuador. 48-60. Quito, Ecuador.

Weil, G. (2004). *Infrared Thermographic Techniques* (Vol. Segunda ed.). Philadelphia: CRC press LLC.

Yahav, S., & Giloh, M. (2012). Infrared Thermography - Applications in Poultry Biological Reseach. En R. Prakash, *Infrared Thermography* (págs. 93-116). Croacia: Intech.

Yamauchi, T. (2012). Application of IR Thermography for Studing Deformation and Fracture of Paper. En R. Prakash, *Infrared Thermography* (págs. 3-25). Croacia: InTech.

ANEXOS

ANEXO 1 – Especificaciones cámara termográfica Milwaukee

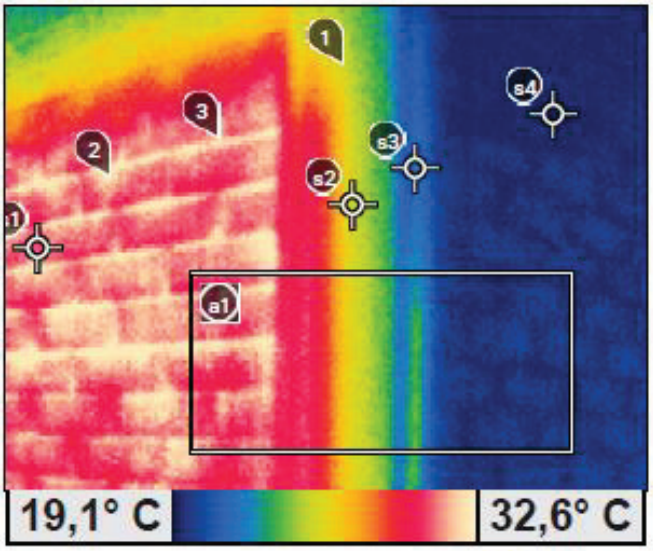
Tabla 1 Características cámara termográfica MILWAUKEE

FISICAS Y AMBIENTALES	
Prueba de caída	Caída de 3 pies (1 m) sobre hormigón
Rango de temperatura de funcionamiento	De -10 °C a 50 °C
Rango de temperatura de almacenamiento	Del 10% al 90%, sin condensación
Rango de temperatura de batería	De -25 °C a 60 °C
MEDICIÓN DE TEMPERATURA	
Resolución infrarroja (IR)	160x120 pixeles (elementos de imagen o puntos de datos)
Rango de temperatura del objeto	De -10 °C a 350 °C
Sensibilidad térmica	0,1 °C a 30 °C NETD (diferencia de temperatura equivalente a ruido)
Resolución espacial	2,7 mrad IFOV (campo de visión instantáneo)
exactitud	± 2 °C o ± 2% de la lectura, el que sea mayor
Emisividad ajustable incorporada	Variable entre 0,01 y 1,00, en incrementos de 0,01
Tipo de detector infrarrojo (IR)	Matriz de plano focal (FPA) de microbolómetro no refrigerado
Rango espectral	De 8 a 14 µm
IMÁGENES TÉRMICAS	
Campo de visión (FOV)	25° horizontal x 19° vertical
Método de enfoque	Manual
Distancia mínima de enfoque	10 cm
Actualización de pantalla	60 Hz
IMÁGENES VISUALES	
Resolución de la cámara digital visual	1,3 megapíxeles
Tiempo de visión	56° horizontal x 46° vertical
Distancia mínima de enfoque	30 cm
Método de enfoque	Fijo
Control de exposición	Automático
Linterna LED	Encendido o pagado elegible por el usuario
GENERAL	
Sistema de batería	Batería recargable de ion de litio extraíble serie M12 y cargador de baterías serie M12 de MILWAUKKE
Sistema de almacenamiento de imágenes	Tarjetas SD de 2GB extraíble instalada, espacio para >300 conjuntos de imágenes. La cámara termográfica se ha probado para alojar una tarjeta SD de hasta 32GB (>4800 conjuntos de imágenes).
Interfaz de comunicación de datos	Mini USB con alete de hule (llamada puerta de medios) para protección contra el polvo y el agua
Pantalla	TFT-LCD color de 9 cm diagonal

Fuente: (Milwaukee, 2015)

Figura 0-1 Cámara thermal imager MILWAUKEE (160X120 PIXELES)
Fuente: Propia

ANEXO 2 – Configuración analizada.



NOTES

- s1 **31.1° C**
- s2 **25.7° C**
- s3 **22.0° C**
- s4 **19.1° C**
- a1 **25,1° C Prom.**
  Máx: 33.6° C Min: 18.6° C
- 1 Viga de Acero estructural
- 2 Ladrillo
- 3 Union de Cemento

PROBLEM DESCRIPTION

Configuración esquinera ubicada en la parte externa de la planta, Bloque A.
Esta compuesta por ladrillos, con una viga de acero, unidas entre si por medio de cemento.

RECOMMENDATION

Se observa una variacion de temperatura en ambas paredes. La parte derecha esta sometida a una radiacion por parte del sol; y la parte izquierda por tener una cubierta en la parte superior presenta una temperatura mas baja.

ANEXO 3 – Simulación de un ladrillo con agujeros

El análisis presentado a continuación es la configuración de un ladrillo recubierto en sus caras por hormigón.

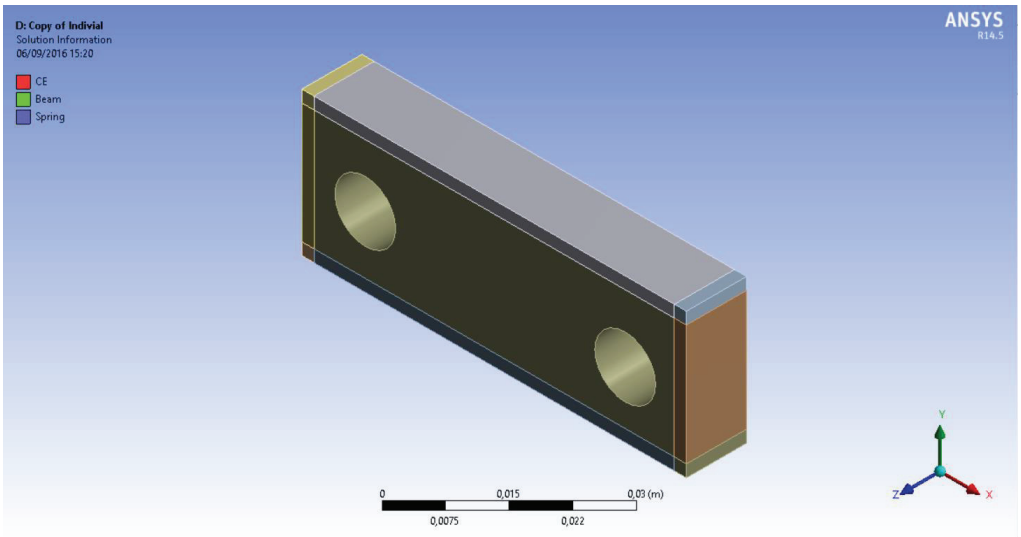


Figura 0-2 Ladrillo con agujeros
Fuente: Propia

Se aplicó los parametros de conducción, radiación y emisividad para cada material (figura 3). Con lo que se desea observar de manera más puntual lo que sucede, si en una pared existen agujeros.

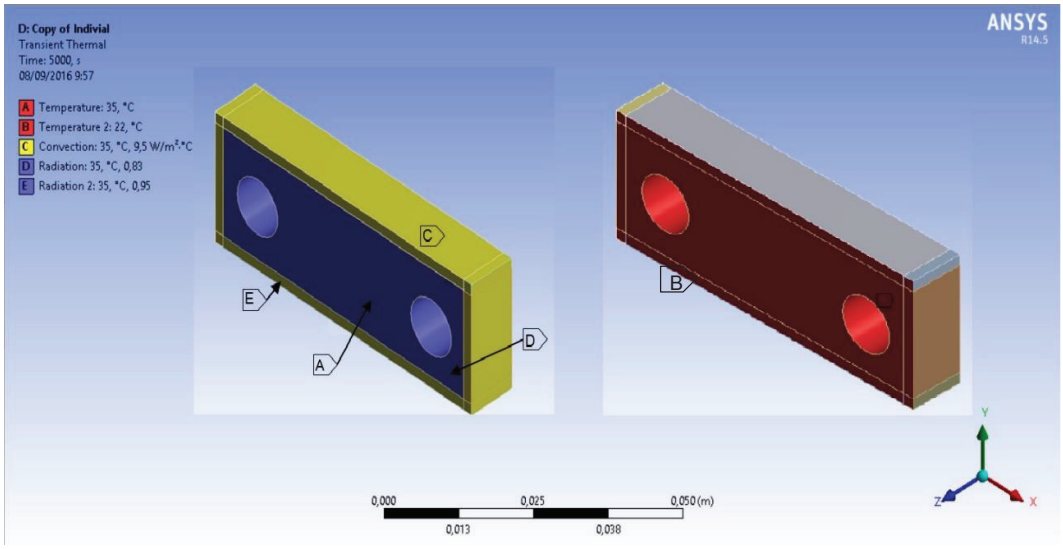


Figura 0-3 Parámetros de ladrillo
Fuente: Propia

Se muestra la variación que existe cuando a un ladrillo se le aplica convección y radiación en una de sus caras (figura 4).

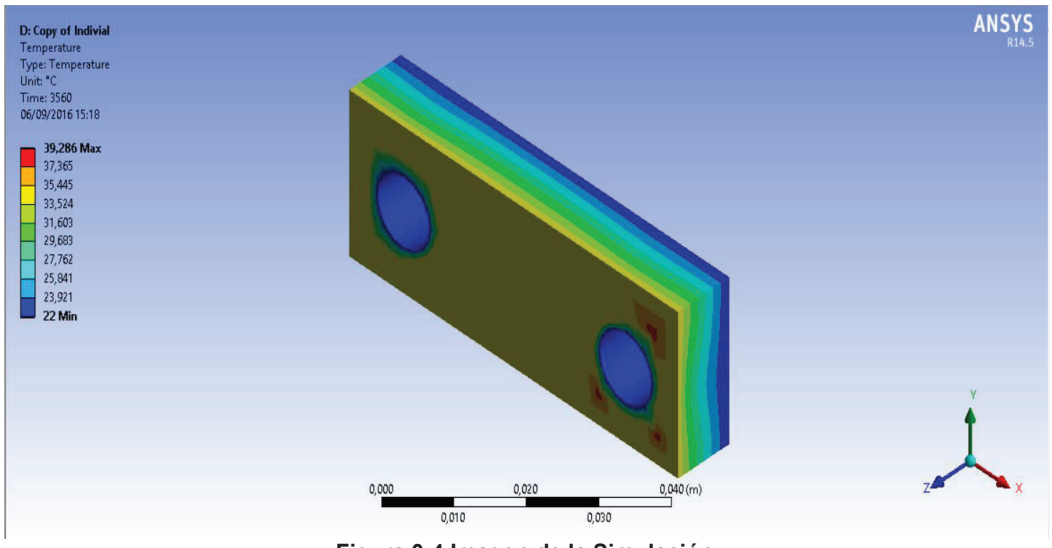


Figura 0-4 Imagen de la Simulación.
Fuente: Propia.

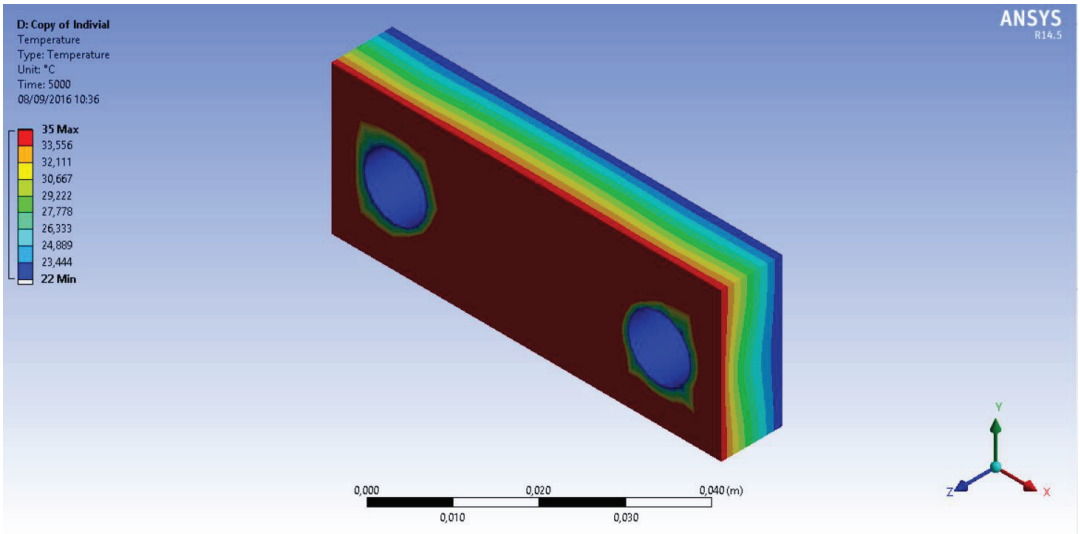


Figura 0-5 Transferencia de calor externa (T = 35 °C)

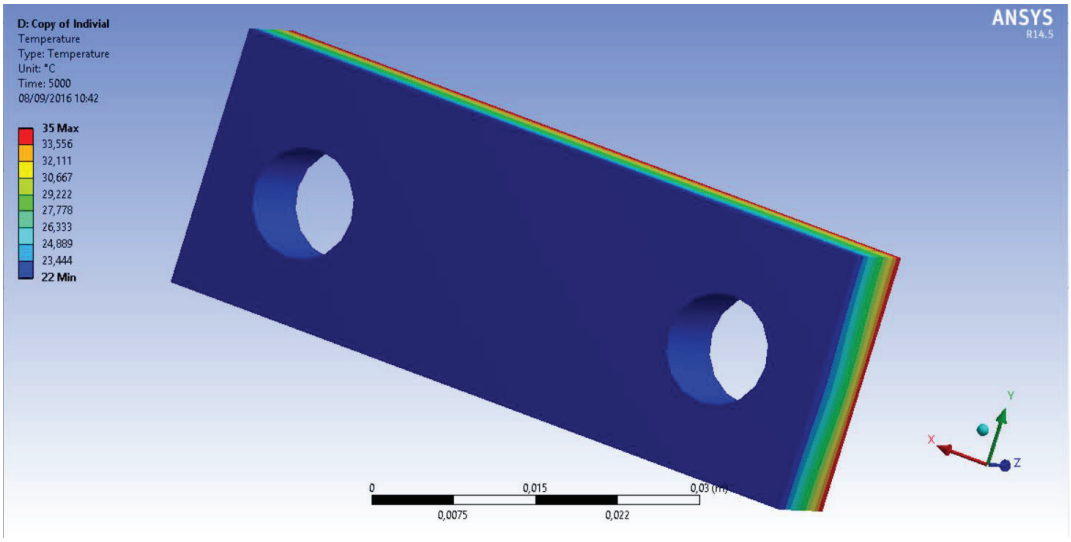


Figura 0-6 Transferencia de calor interna (T = 22 °C)

La figura 5 y 6 muestran, que la transferencia de calor se da a través del cuerpo, es decir de la parte externa a la parte interior del mismo. Los agujeros sufren una ligera transferencia en la superficie (figura 5), mas no en el interior del mismo (figura 6).

El análisis fue realizado con 5000 iteraciones, tomando un tiempo total de 30 minutos.

ANEXO 4 – Formato de especificaciones de modelo ensayo termográfico

INFORME #

Parametros Iniciales		
T° Amb.	XXX	°C
Hora	XXX	a.m.
Material		***Emisividad***
Escoga el Material		---
Escoga el Material		---
Escoga el Material		---

Informacion General	
Cliente	XXX
Fecha	XXX
Técnico	XXX
Locación	XXX

Imagen Termográfica

Imagen Real

Observaciones			
T Máxima			°C
T mínima			°C
T Promedio			°C

Pto.Critico	Temp. °C	Criticidad
1		#N/A
2		#N/A
3		#N/A
4		#N/A

Zonas	Detalle
1	
2	
3	
4	

Pto.	Detalle
1	
2	
3	
4	

Descripción de la Zona Analizada

Conclusiones y Actuaciones a tomar

_____

Firma

ANEXO 5 – Ejemplo 1

INFORME # 1

Parametros Iniciales		
T° Amb.	22	°C
Hora		---
Material	***Emisividad***	
Ladrillo	0,93	
Hierro Ligeramente Oxidado	0,61	
Acero, galvanizado	0,28	

Informacion General	
Cliente	
Fecha	
Técnico	
Locación	Tanque de almacenamiento de diesel

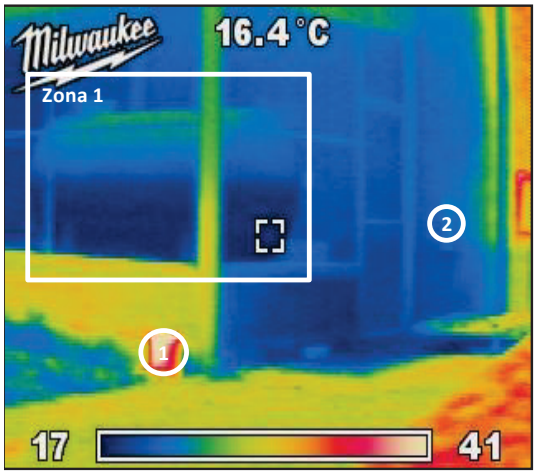


Imagen Termográfica

Imagen Real

Observaciones			
T Máxima	41,0		°C
T mínima	17,0		°C

T Promedio	16,4	°C

Pto.Critico	Temp. °C	Criticidad
1	39	Grave
2	19	Leve
3		
4		

Zonas	Detalle
1	Tanque almacenamiento Diesel
2	
3	
4	

Pto	Detalle
1	Balde de Almacenamiento
2	Extintor
3	
4	

Descripción de la Zona Analizada

Se observa la zona de almacenamiento de Diesel y aceites refrigerantes para usos varios; se presenta de igual forma un extintor y un balde de almacenamiento de aceite en la parte inferior.

Conclusiones y Actuaciones a tomar

La referencia tomada es la emitida por la radicion del sol, por lo que se ve que una mejor adeherencia de calor en el balde. Se observa que el taque se antiene a una temperatura que es apropiada para el mismo, al igual que su estructura exterior que lo protegue de todos los posibles escenarios climaticos.

_____

Firma

ANEXO 6 – Ejemplo 2

INFORME # 2

Parametros Iniciales		
T° Amb.		°C
Hora		---
Material	***Emisividad***	
Hierro Ligeramente Oxidado	0,61	
Concreto	0,85 - 0,95	
Asfalto	0,90 - 0,98	

Informacion General	
Cliente	
Fecha	
Técnico	
Locación	Tuberias de descarga.

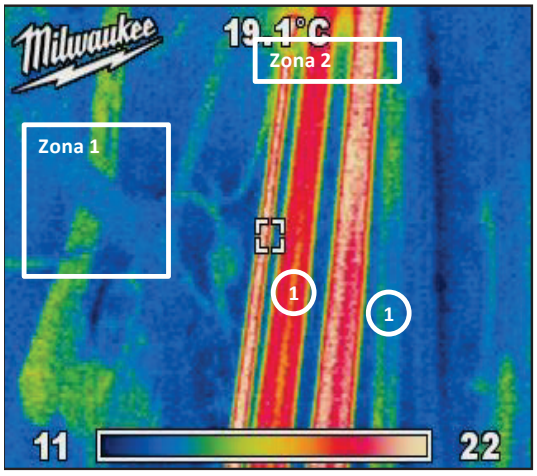


Imagen Termográfica

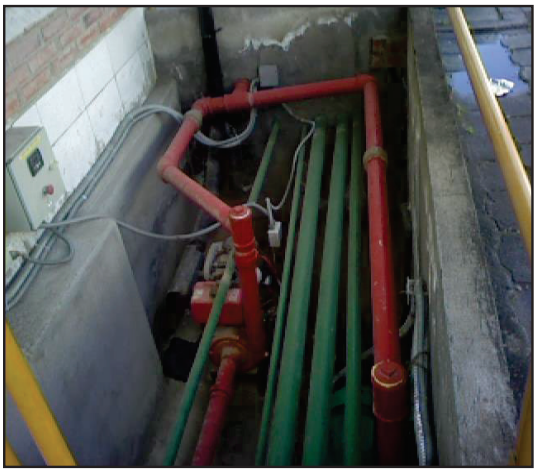


Imagen Real

Observaciones			
T Máxima	22,0		°C
T mínima	11,0		°C

T Promedio	19,1	°C

Pto.Critico	Temp. °C	Criticidad
1	21	Leve
2	14	Leve
3		#N/A
4		#N/A

Zonas	Detalle
1	Tuberia de incendios
2	Tuberia de aire comprimido
3	
4	

Pto	Detalle
1	Tuberia aire comprimido
2	Tuberia de agua
3	
4	

Descripción de la Zona Analizada

Se presenta la zona de tuberias conjuntamente con un compresor que reparten, agua y aire independientemente para el area de producción de la planta.

Conclusiones y Actuaciones a tomar

Existe una variacion de temperatura por el color utilizado en la pintura de la tuberia, al igual que el fluido que pasa por el mismo.

_____

Firma

ANEXO 7 – Ejemplo 3

INFORME # 3

Parametros Iniciales		
T° Amb.	11	°C
Hora		---
Material	***Emisividad***	
Acero Suave	0,12	
	#N/A	
	#N/A	

Informacion General	
Cliente	
Fecha	
Técnico	
Locación	Gradas metálicas

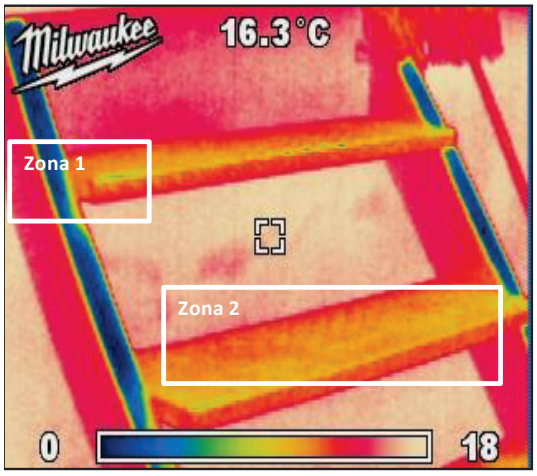


Imagen Termográfica

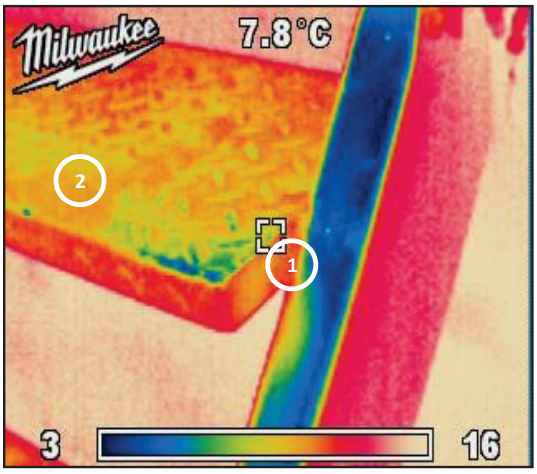


Imagen Real

Observaciones			
T Máxima	18,0		°C
T mínima	0,0		°C

T Promedio	9,0	°C

Pto.Critico	Temp. [°C]	Criticidad
1	14	Leve
2	7	Normal
3		#N/A
4		#N/A

Zonas	Detalle
1	Soldadura
2	Grada metálica
3	
4	

Zonas	Detalle
1	
2	
3	
4	

Descripción de la Zona Analizada

Gradas metálicas que dan acceso a tanques de almacenamiento de GLP, consta de 4 escalones con soldadura en cada punto de la misma; en los extremos estan asegurados por medio de ganchos.

Conclusiones y Actuaciones a tomar

Se observa claramente la soldadura y la variación de calor presente en la misma, el codigo de colores analizado muestra la variación de calor presente por los materiales en cuestión.

_____

Firma

ANEXO 8 – Comandos realizados por ANSYS para Convección

```
/batch,list
/show
/title, Demonstration of position-varying film coefficient using Tabular
BC's.
/com * ------------------------------------------------------------------
/com * Table Support of boundary conditions
/com *
/com * Boundary Condition Type  Primary Variables  Independent Parameters
/com * ----------------------  -----------------  ---------------------
/com * Convection:Film Coefficient  X                        -
/com *
/com * Problem description
/com * A static Heat Transfer problem. A 2 x 1 rectangular plate is
/com * subjected to temperature constraint at one of its end, while the
/com * remaining perimeter of the plate is subjected to a convection
boundary
/com * condition. The film coefficient is a function of X-position and is
described
/com * by a parametric table 'cnvtab'.
/com **
*dim,cnvtab,table,5,,,x                ! table definition.
cnvtab(1,0) = 0.0,0.50,1.0,1.50,2.0      ! Variable name, Var1 = 'X'
cnvtab(1,1) = 20.0,30.0,50.0,80.0,120.0
/prep7
esize,0.5
et,1,55
rect,0,2,0,1
amesh,1
MP,KXX,,1.0
MP,DENS,,10.0
MP,C,,100.0
lsel,s,loc,x,0
dl,all,,temp,100
alls
lsel,u,loc,x,0
nsll,s,1
sf,all,conv,%cnvtab%,20
alls
/psf,conv,hcoef,2                     ! show convection bc.
/pnum,tabn,on                         ! show table names
nplot
fini
/solu
anty,static
kbc,1
nsubst,1
time,60
tunif,50
outres,all,all
solve
finish
/post1
set,last
sflist,all                            ! Numerical values of convection bc's
/pnum,tabn,off                        ! turn off table name
/psf,conv,hcoef,2                     ! show convection bc.
/pnum,sval,1                          ! show numerical values of table bc's
eplot! convection at t=60 sec.
plns,temp
finish
```

ANEXO 9 – Comandos realizados por ANSYS para Conducción y Radiación

```
/PREP7
/TITLE,Steady-state thermal analysis of pipe junction
/UNITS,BIN                    ! Use U. S. Customary system of units
(inches)
/SHOW,                        ! Specify graphics driver for interactive
run
!
ET,1,90                       ! Define 20-node, 3-D thermal solid element
MP,DENS,1,.285                ! Density = .285 lbf/in^3
MPTEMP,,70,200,300,400,500    ! Create temperature table
MPDATA,KXX,1,,8.35/12,8.90/12,9.35/12,9.80/12,10.23/12
                              ! Define conductivity values
MPDATA,C,1,,.113,.117,.119,.122,.125
                              ! Define specific heat values
MPDATA,HF,2,,426/144,405/144,352/144,275/144,221/144
                              ! Define film coefficients

! Define parameters for model generation
RI1=1.3                       ! Inside radius of cylindrical tank
RO1=1.5                       ! Outside radius
Z1=2                          ! Length
RI2=.4                        ! Inside radius of pipe
RO2=.5                        ! Outside pipe radius
Z2=2                          ! Pipe length
!
CYLIND,RI1,RO1,,Z1,,90        ! 90 degree cylindrical volume for tank
WPROTA,0,-90                  ! Rotate working plane to pipe axis
CYLIND,RI2,RO2,,Z2,-90        ! 90 degree cylindrical volume for pipe
WPSTYL,DEFA                   ! Return working plane to default setting
BOPT,NUMB,OFF                 ! Turn off Boolean numbering warning
VOVLAP,1,2                    ! Overlap the two cylinders
/PNUM,VOLU,1                  ! Turn volume numbers on
/VIEW,,-3,-1,1
/TYPE,,4
/TITLE,Volumes used in building pipe/tank junction
VPLOT
VDELE,3,4,,1                  ! Trim off excess volumes

! Meshing
ASEL,,LOC,Z,Z1                ! Select area at remote Z edge of tank
ASEL,A,LOC,Y,0                ! Select area at remote Y edge of tank
CM,AREMOTE,AREA               ! Create area component called AREMOTE
/PNUM,AREA,1
/PNUM,LINE,1
/TITLE,Lines showing the portion being modeled
APLOT
/NOERASE
LPLOT                         ! Overlay line plot on area plot
/ERASE
ACCAT,ALL                     ! Concatenate areas and lines
                              ! at remote tank edges
LCCAT,12,7
LCCAT,10,5
LESIZE,20,,,4                 ! 4 divisions through pipe thickness
LESIZE,40,,,6                 ! 6 divisions along pipe length
LESIZE,6,,,4                  ! 4 divisions through tank thickness
ALLSEL                        ! Restore full set of entities
ESIZE,.4                      ! Set default element size
MSHAPE,0,3D                   ! Choose mapped brick mesh
MSHKEY,1
```

```
SAVE                          ! Save database before meshing
VMESH,ALL                     ! Generate nodes and elements within volumes
/PNUM,DEFA
/TITLE,Elements in portion being modeled
EPLOT
FINISH
!
/COM, *** Obtain solution ***
!
/SOLU
ANTYPE,STATIC               ! Steady-state analysis type
NROPT,AUTO                  ! Program-chosen Newton-Raphson option
TUNIF,450                   ! Uniform starting temperature at all nodes
CSYS,1
NSEL,S,LOC,X,RI1            ! Nodes on inner tank surface
SF,ALL,CONV,250/144,450     ! Convection load at all nodes
CMSEL,,AREMOTE              ! Select AREMOTE component
NSLA,,1                     ! Nodes belonging to AREMOTE
D,ALL,TEMP,450              ! Temperature constraints at those nodes
WPROTA,0,-90                ! Rotate working plane to pipe axis
CSWPLA,11,1                 ! Define local cylindrical c.s at working
plane
NSEL,S,LOC,X,RI2            ! Nodes on inner pipe surface
SF,ALL,CONV,-2,100          ! Temperature-dep. convection load at those
nodes
ALLSEL
/PBC,TEMP,,1                ! Temperature b.c. symbols on
/PSF,CONV,,2                ! Convection symbols on
/TITLE,Boundary conditions
NPLOT
WPSTYL,DEFA
CSYS,0
AUTOTS,ON                   ! Automatic time stepping
NSUBST,50                   ! Number of substeps
KBC,0                       ! Ramped loading (default)
OUTPR,NSOL,LAST             ! Optional command for solution printout
SOLVE
FINISH
!
/COM, *** Review results ***
!
/POST1
/EDGE,,1                    ! Edge display
/PLOPTS,INFO,ON             ! Legend column on
/PLOPTS,LEG1,OFF            ! Legend header off
/WINDOW,1,SQUARE            ! Redefine window size
/TITLE,Temperature contours at pipe/tank junction
PLNSOL,TEMP                 ! Plot temperature contours
CSYS,11
NSEL,,LOC,X,RO2             ! Nodes and elements at outer radius of pipe
ESLN
NSLE
/SHOW,,,1                   ! Vector mode
/TITLE,Thermal flux vectors at pipe/tank junction
PLVECT,TF                   ! Plot thermal flux vectors
FINISH
/EXIT,ALL
```