

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

TEMA:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN
DE SUELO RADIANTE HIDRÁULICO APLICADO A CRIADERO
PORCINO DEL BARRIO “LA DELICIA” DEL CANTÓN SALCEDO.**

AUTOR:

Edison Jefferson Segura Lara

Tutor: Ing. Mg. Luis Escobar

AMBATO – ECUADOR

2016

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de éste proyecto técnico o parte de él un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi proyecto técnico, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de éste trabajo experimental, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

.....

Edison Jefferson Segura Lara

CI: 1804765566

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de tutor del trabajo de investigación, con el tema “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE SUELO RADIANTE HIDRÁULICO APLICADO A CRIADERO PORCINO DEL BARRIO “LA DELICIA” DEL CANTÓN SALCEDO”, desarrollado por el estudiante Edison Jefferson Segura Lara, egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, me permito informar que este ha sido concluido en su totalidad, y por tanto puede continuar con el respectivo tramite de graduación.

Ambato, Mayo de 2016

.....

Ing. Mg. Luis Escobar

DOCENTE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE TRABAJO

Yo, Edison Jefferson Segura Lara, portador de la C.I. 1804765566 declaro que los criterios expresados en la investigación denominada “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE SUELO RADIANTE HIDRÁULICO APLICADO A CRIADERO PORCINO DEL BARRIO “LA DELICIA” DEL CANTÓN SALCEDO”, así como también las ideas, análisis, conclusiones y propuesta original son de exclusiva responsabilidad de mi persona como autor de la presente investigación de grado.

Ambato, Mayo de 2016

EL AUTOR

.....

Edison Jefferson Segura Lara

C.I. 1804765566

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico principalmente a mis padres, que día a día han sabido confiar en mí y con sus consejos y regaños me han sabido guiar por el camino del bien, a Dios que en todo momento me ha brindado las fuerzas y la sabiduría necesarias para enfrentar los retos de la vida diaria, a toda mi familia que en las buenas y en las malas están presentes para brindarme su apoyo.

Edison Segura

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de todo corazón a mi tutor de proyecto el Ing. Luis Escobar que me ha sabido tener paciencia y ha sabido brindarme su apoyo y sus conocimientos para la correcta realización del presente proyecto, a la Universidad Técnica de Ambato, a las autoridades y docentes de la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica que a diario brindan sus conocimientos y su amistad para formar profesionales y personas de éxito y de valores, a todos mis amigos que me han apoyado en momentos que más los necesitaba.

Edison Segura

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DERECHOS DE AUTOR	II
CERTIFICACIÓN	III
AUTORÍA DE TRABAJO	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VI
RESUMEN EJECUTIVO	XVI
CAPÍTULO I.....	1
EL PROBLEMA	1
1.1. Tema	1
1.2. Justificación	1
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2. Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO II.....	6
FUNDAMENTACIÓN	6
2.1. Investigaciones previas	6
2.2. Fundamentación legal.....	7
2.3. Fundamentación teórica.....	7
2.3.1. Confort térmico.....	7
2.3.2. Historia del suelo radiante	9
2.3.3. Funcionamiento	10
2.3.4. Ventajas	12
2.3.4.1. Perfil óptimo de temperaturas del cuerpo humano.	12
2.3.4.2. Emisión térmica uniforme	12
2.3.4.3. Calefacción sin movimiento de aire.....	13

2.3.4.4.	Ahorro energético	13
2.3.4.5.	Compatible con casi cualquier fuente de energía	14
2.3.4.6.	Calefacción invisible.....	14
2.3.4.7.	Compatible con cualquier tipo de suelos	14
2.3.5.	Elementos constitutivos	14
2.3.5.1.	El Forjado	15
2.3.5.2.	Panel de Aislamiento	15
2.3.5.3.	Cinta perimetral	16
2.3.5.4.	Lámina de polietileno	16
2.3.5.5.	Tubería.....	17
2.3.5.5.1.	Tubería de cobre	17
2.3.5.5.2.	Tubería de polietileno reticulado	19
2.3.5.5.3.	Tipos de circuitos.....	20
2.3.5.6.	Mortero	22
2.3.5.7.	Grupo de impulsión	22
2.3.5.8.	Sistema de regulación	23
2.3.5.9.	La fuente de calor	23
2.3.5.9.1.	Calefones	23
2.4.	Mecanismos de transferencia de calor	24
2.4.1.	Conducción	24
2.4.1.1.	Conductividad térmica.....	26
2.5.	Confort térmico porcino.....	26
2.5.1.	La temperatura en ganado porcino.....	27
2.5.1.1.	Temperaturas de los corrales al momento de nacimiento de acuerdo al tipo de suelo.	28
2.5.1.2.	Temperaturas críticas inferiores y superiores de acuerdo al peso del cerdo.	28

2.5.1.3.	Temperaturas del local luego de 21 semanas de separar de las madres. .	29
2.5.1.4.	Temperaturas óptimas para cerdas en gestación.....	29
2.5.1.5.	Temperatura general en corrales en la etapa de maternidad	29
2.5.1.6.	Temperaturas en nidos de nacimiento	30
CAPÍTULO III	31
DISEÑO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN	31
3.1.	Diseño del circuito hidráulico.....	31
3.2.	Selección de la tubería	33
3.2.1.	Cañería de cobre	34
3.2.2.	Tubería flexible de polietileno.....	34
3.3.	Cálculo de la carga térmica.....	35
3.4.	Cálculo del caudal de agua	37
3.5.	Selección del grupo de impulsión.....	38
3.5.1.	Cálculo de pérdidas por fricción.....	39
3.5.2.	Cálculo de pérdidas por accesorios.....	42
3.5.3.	Cálculo de la potencia de la bomba	44
3.6.	Selección de la fuente de calor	44
3.7.	Selección del aislante.....	44
3.7.1.	Composición del aglomerado	45
3.7.2.	Cálculo de la conductividad térmica de la cascarilla de arroz.....	46
3.7.2.1.	Equipos y materiales utilizados para el ensayo.	46
3.7.2.1.1.	Prototipo de placa caliente.....	46
3.7.2.1.2.	Multímetro	47
3.7.2.1.3.	Termocupla tipo K.....	48
3.7.2.1.4.	Placas de aluminio	48
3.7.2.1.5.	Materiales a ensayar.....	49
3.7.2.2.	Descripción del ensayo	50

3.7.3.	Resultados del ensayo	55
3.8.	Cálculo del espesor del aislante	58
3.9.	Instalación de suelo radiante.....	59
3.9.1.	Instalación de lámina de polietileno	59
3.9.2.	Instalación de la banda perimetral	60
3.9.3.	Tendido de lámina aislante	61
3.9.4.	Colocación de malla electro soldada	61
3.9.5.	Tendido de lámina de polietileno sobre malla electro soldada.....	62
3.9.6.	Tendido de la tubería	63
3.9.7.	Instalación de fuente de calor	64
3.9.8.	Instalación del grupo de impulsión.....	66
3.9.9.	Regulación de temperatura y caudal.....	69
3.9.10.	Pruebas de verificación.....	69
3.9.11.	Tendido del mortero.....	69
3.9.12.	Pruebas de funcionamiento.....	71
3.10.	Resultados.....	72
3.10.1.	Temperaturas de calefacción en suelo radiante	72
3.10.2.	Pruebas de enfriamiento de suelo radiante vs tiempo.....	73
3.11.	Salto térmico.....	74
3.12.	Cálculo de la eficiencia del sistema.....	75
3.12.1.	Cálculo del calor de entrada.....	75
3.12.2.	Cálculo del calor de salida.....	76
3.13.	Presupuesto	77
3.13.1.	Costos de equipos y materiales.....	77
3.13.1.1.	Costos de equipos	77
3.13.1.2.	Costos de materiales	78
3.13.2.	Costos varios.....	79

3.13.3. Costo total.....	79
CAPÍTULO IV	80
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
4.1. Conclusiones.....	80
4.2. Recomendaciones	81
FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	82
ANEXOS	84
PLANOS	101

ANEXOS

ANEXO A Características técnicas del tubo de polietileno	85
ANEXO B Factores de forma de diferentes configuraciones.....	86
ANEXO C Propiedades de líquidos en los puntos de ebullición y congelación.....	88
ANEXO D Propiedades de materiales de construcción	89
ANEXO E Ensayo de conductividad térmica	90
ANEXO F Propiedades del agua a diferentes temperaturas.....	94
ANEXO G Valores de diseño de la rugosidad de tuberías.....	95
ANEXO H Factores de fricción para diferentes tamaños de tubería.....	95
ANEXO I Longitudes equivalentes de diferentes accesorios.....	96
ANEXO J Preparación del aglomerado	97
ANEXO K Calefón de agua a gas	98
ANEXO L Placa de características de la bomba.....	98
ANEXO M Norma ASTM C-177	98
ANEXO N Comparación de paso de serpentín	99

ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Temperaturas óptimas en corrales de criaderos	3
---	---

Tabla 2. 1 Comparación de la conductividad térmica de la cascarilla de arroz y algunos aislantes comerciales	16
Tabla 2. 2 Características del cobre	18
Tabla 2. 3 Temperaturas optimas de acuerdo al tipo de suelo	28
Tabla 2. 4 Temperaturas criticas de acuerdo al peso del cerdo	28
Tabla 2. 5 Temperaturas optimas luego de destete	29
Tabla 2. 6 Temperaturas óptimas para cerdas en gestación	29
Tabla 2. 7 Temperaturas óptimas para cerdas madres	29
Tabla 2. 8 Temperaturas óptimas para nidos de nacimiento	30
Tabla 3. 1 Costos cañería de cobre.....	34
Tabla 3. 2 Costos tubería de polietileno.....	35
Tabla 3. 3 Temperaturas de diseño.....	35
Tabla 3. 4 Datos de diseño	37
Tabla 3. 5 Valores para cálculo de caudal.....	37
Tabla 3. 6 Dimensiones para prototipo de placa caliente.....	47
Tabla 3. 7 Conductividades de cascarilla de arroz sin aglomerantes	55
Tabla 3. 8: Conductividades de cascarilla de arroz espuma de poliestireno y cascarilla de arroz.....	56
Tabla 3. 9 Conductividades de cascarilla de arroz aglomerada con resina de vinil acrílico.....	57
Tabla 3. 10 Conductividades de diferentes aislantes.....	58
Tabla 3. 11 Temperaturas de piso radiante	72
Tabla 3. 12 Temperaturas de piso radiante	73
Tabla 3. 13 Salto térmico	74
Tabla 3. 14 Temperaturas del sistema.....	75
Tabla 3. 15 Costos de equipos.....	77
Tabla 3. 16 Costos de materiales.....	78
Tabla 3. 17 Costos varios	79
Tabla 3. 18 Costo total	79

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1. 1 Distribución ideal de temperatura Vs. Distribución en diferentes sistemas de calefacción.....	1
Figura 1. 2 Distribución de temperaturas mediante suelo radiante.....	2
Figura 1. 3 Suelo radiante hidráulico	3
Figura 1. 4 Galpón de cría porcina.....	4
Figura 1. 5 Corral para pruebas de suelo radiante.....	4
Figura 2. 1 Distribución de temperatura de suelo radiante	9
Figura 2. 2 Primeros hipocaustos.....	9
Figura 2. 3 Partes de un suelo radiante	10
Figura 2. 4 Principio de funcionamiento.....	11
Figura 2. 5 Distribución de temperaturas diferentes sistemas	12
Figura 2. 6 Distribución de temperaturas en suelo radiante.....	13
Figura 2. 7 Elementos de suelo radiante	14
Figura 2. 8 Cascarilla de arroz	15
Figura 2. 9 Lámina de polietileno	17
Figura 2. 10 Tubos de cobre.....	17
Figura 2. 11 Tubos de polietileno	19
Figura 2. 12 Tubos de polietileno.....	20
Figura 2. 13 Configuración en doble serpentín.....	21
Figura 2. 14 Configuración en espiral.....	22
Figura 2. 15 Calefón a gas	23
Figura 2. 16 Partes de un calefón.....	24
Figura 2. 17 Conducción de calor	25
Figura 3. 1 Distribución del piso del corral	31
Figura 3. 2 Serpentín.....	32
Figura 3. 3 Paso entre tubos	32
Figura 3. 4 Aglomerado de resina con cascarilla de arroz	45
Figura 3. 5 Aglomerado de resina con cascarilla de arroz	46
Figura 3. 6 Prototipo para ensayos de conductividad	47
Figura 3. 7 Multímetro para toma de datos	48
Figura 3. 8 Medidor de temperaturas tipo k.....	48

Figura 3. 9	Placa de aluminio.....	49
Figura 3. 10	Probeta de cascarilla de arroz con resina de vinil acrílico.....	49
Figura 3. 11	Lamina de poliestireno	50
Figura 3. 12	Cascarilla de arroz sin aglomerantes	50
Figura 3. 13	Dimensiones de las probetas ensayadas	50
Figura 3. 14	Calentamiento de placa caliente	51
Figura 3. 15	Prototipo de placa caliente operando.....	52
Figura 3. 16	Multímetro midiendo temperatura.....	52
Figura 3. 17	Voltaje de la fuente de calor	53
Figura 3. 18	Lámina de polietileno	59
Figura 3. 19	Tendido de lámina de polietileno	60
Figura 3. 20	Banda perimetral.....	60
Figura 3. 21	Instalación de banda perimetral.....	60
Figura 3. 22	Instalación del aislante.....	61
Figura 3. 23	Piso con aislamiento de aglomerado de cascarilla de arroz.....	61
Figura 3. 24	Malla de acero Electro soldada.....	62
Figura 3. 25	Malla de acero Electro soldada sobre lámina de aislamiento.....	62
Figura 3. 26	Lámina de polietileno y malla electro soldada	63
Figura 3. 27	Lámina de polietileno tendida sobre malla electro soldada.....	63
Figura 3. 28	Tendido de red de tuberías.....	64
Figura 3. 29	Serpentín en espiral	64
Figura 3. 30	Tubería de entrada, salida y calefacción de agua	65
Figura 3. 31	Medidores de temperatura entrada y salida de serpentín.....	65
Figura 3. 32	Estructura Metálica.....	66
Figura 3. 33	Bomba de agua	66
Figura 3. 34	Tanque de almacenamiento	67
Figura 3. 35	Tubería de succión.....	67
Figura 3. 36	Tubería de descarga de la bomba	67
Figura 3. 37	Tubería de descarga a tanque de almacenamiento.....	68
Figura 3. 38	Sistema de impulsión y calentamiento completo	68
Figura 3. 39	Circuito con fuente de calor.....	69
Figura 3. 40	Mortero	70
Figura 3. 41	Tendido y nivelado del mortero.....	70

Figura 3. 42 Piso completamente terminado.....	71
Figura 3. 43 Suelo radiante instalado.....	71
Figura 3. 44 Temperatura vs tiempo de calentamiento.....	73
Figura 3. 45 Temperatura vs tiempo de enfriamiento.....	74

RESUMEN EJECUTIVO

En el presente proyecto se construyó un sistema de calefacción porcina de suelo radiante hidráulico, diseñado con materiales que se los puede adquirir fácilmente en el país y con características bioecológicas, centrándose al estudio de las variables de funcionamiento como lo son la conductividad térmica en los materiales utilizados y el aislamiento de calor a fin de promover confort térmico en los organismos de estudio. Se determinó las propiedades físicas de los materiales para maximizar el funcionamiento del sistema de suelo radiante hidráulico. Por medio de ensayos de placa caliente se determinó la conductividad térmica de diferentes aislantes, seleccionando el que mejor se adapte al funcionamiento del sistema. Para la construcción se seleccionó una tubería de polietileno y un aislamiento de aglomerado de cascarilla de arroz con resina de polivinilo. Con la ayuda de equipos de medición se obtuvieron las temperaturas del local sin ningún tipo de calefacción y posteriormente se midieron las temperaturas ya instalado el sistema de calefacción realizando una comparación del funcionamiento del sistema, obteniendo resultados favorables.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Tema

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE SUELO RADIANTE HIDRÁULICO APLICADO A CRIADERO PORCINO DEL BARRIO “LA DELICIA” DEL CANTÓN SALCEDO.

1.2. Justificación

El presente estudio o proyecto técnico revela su importancia en la aplicación de un sistema de calefacción por suelo radiante hidráulico, según [1] este sistema es considerado como uno de los métodos de mayor eficacia al compararlos con el resto de invenciones determinadas a cumplir el mismo proceso, los denominados sistemas convencionales tienden a calentar el ambiente desde la parte superior del área hasta el suelo, lo cual implica una mayor concentración de calor en el techo mientras que en la superficie inferior es mínimo. Y debido a que los animales pasan todo el tiempo en el piso existe la necesidad de elevar las temperaturas en la zona baja para una óptima calefacción. De ahí la relevancia por obtener parámetros de diseño y construcción en sistemas de calefacción que distribuyan la temperatura de una manera uniforme dando a conocer cómo influyen en las características ambientales de naves industriales, viviendas, y alojamientos agroindustriales, tal como se muestra en la Figura 1.1.



Figura 1. 1 Distribución ideal de temperatura Vs. Distribución en diferentes sistemas de calefacción

Fuente: www.tuberplas.com/sueloradiante.php

La calefacción por suelo radiante beneficia en gran medida la cría de ganado porcino, gracias a la distribución uniforme de calor en el piso y posteriormente en el ambiente modifica positivamente las condiciones externas y circunstancias que afectan la salud y el bienestar tanto reproductivo como de crecimiento del animal, mientras el animal se encuentre en un ambiente de confort el desempeño de la granja mejora notablemente disminuyendo la cantidad de alimento consumido, las muertes en el nacimiento y el tiempo de salida al mercado.

Este sistema de calefacción utiliza la transmisión de calor de uno a otro elemento como se muestra en la Figura 1.2, para elevar la temperatura de cualquier ambiente donde haya sido instalado el calor generado en los tubos se conduce a la superficie interior. Es uno de los sistemas más saludables, debido a que no emite corrientes de aire caliente ni movimientos de microorganismos en el ambiente, evitando la aparición de enfermedades respiratorias, siendo el único sistema recomendado por la Organización Mundial de la Salud. [1]

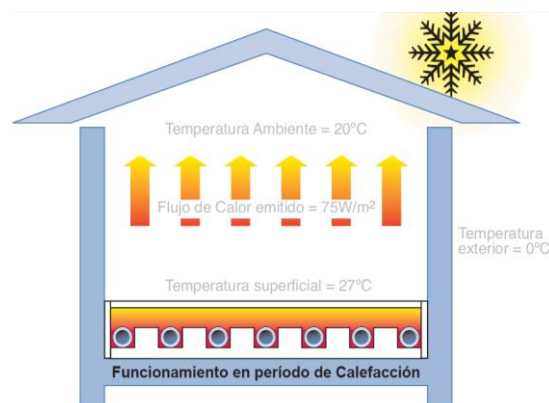


Figura 1. 2 Distribución de temperaturas mediante suelo radiante

Fuente: www.lansolar.com/paginas/sueloradiante.html

El sistema de calefacción por suelo radiante es energéticamente eficiente debido a que necesita bajas temperaturas de entrada entre 40-45 °C por lo que ahorra energía si se compara a comparación de otras instalaciones que requieren temperaturas de entrada mayores a los 80°C. Debido a estas características el sistema de suelo radiante obtiene un ahorro de energía que oscila entre 20-30% respecto a los sistemas tradicionales. [2]

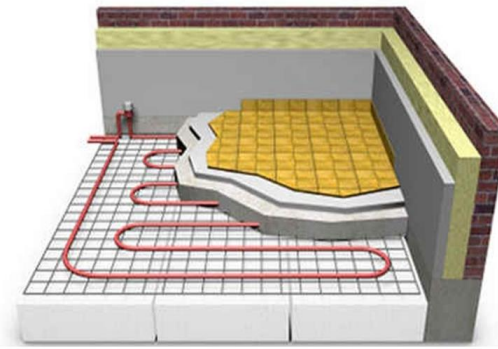


Figura 1. 3 Suelo radiante hidráulico

Fuente: www.lansolar.com/paginas/sueloradiante.html

El interés existente en el diseño y construcción de un sistema de calefacción de suelo radiante hidráulico para calefacción porcina, radica en la optimización de los recursos utilizados para el acondicionamiento de aire para calefacción del lugar, como se muestra en la figura 1.3 este método de calefacción utiliza como fuente de calor la misma superficie donde se aloja este tipo de ganado, debido a que la temperatura necesaria en los corrales oscila de 20-30 °C tal como se muestra en la Tabla 1.1, mediante la implementación de este método de calefacción se utilizará la energía de una manera eficiente debido a que la temperatura generada será únicamente la necesaria, evitando las generaciones innecesarias, dando lugar a la optimización de los recursos energéticos y reduciendo los costos de consumo por sistemas de acondicionamiento de aire utilizados en dichos galpones.

Tabla 1. 1 Temperaturas óptimas en corrales de criaderos

Etapa productiva	Edad	Temperatura
Hembras gestantes		20 °C
Machos reproductores		20 °C
Madres lactantes	Sala	20 °C
Nacimiento lechón	0-21 días	28-32 °C (Plancha térmica o criadoras)
Recrias	21-28 días	28 °C
	29-35 días	26-27 °C
	35-42 días	24-25 °C
	42-49 días	22-23 °C
	50-70 días	Temperatura ambiente
Engorde	70-170 días	22-23 °C
		Temperatura ambiente

Fuente: MAGAP. Bienestar animal.

El estudio de calefacción mediante suelo radiante hidráulico se ha abordado desde el siglo XII antes de Cristo en países de Europa tales como España, estos sistemas no eran tan sofisticados como los de la actualidad, a nivel nacional el estudio de calefacción mediante suelo radiante hidráulico se ha visto opacado por los sistemas de calefacción convencional, por lo tanto el presente trabajo permitirá obtener datos adecuados para la construcción de un sistema de calefacción de suelo radiante hidráulico que permita el bienestar y confort de los ocupantes de la superficie temperada.



Figura 1. 4 Galpón de cría porcina

Fuente: Autor



Figura 1. 5 Corral para pruebas de suelo radiante

Fuente: Autor

El estudio propuesto es factible puesto que en el barrio “La Delicia”, ubicado en el cantón Salcedo, no se ha llevado a cabo un sistema de calefacción de suelo radiante hidráulico; siendo de fácil manejo debido a que se dispone de amplia información bibliográfica en cuanto a los parámetros de funcionamiento, es tecnológicamente factible porque se cuenta con los equipos, materiales y el lugar necesarios para el diseño y las pruebas de factibilidad. El proyecto será financiado en su totalidad por el

autor y el principal objetivo por el cual se lo realiza es la obtención de parámetros y características constructivas de sistemas de calefacción de suelo radiante hidráulico.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar y construir un sistema de calefacción, mediante la utilización de suelo radiante hidráulico para mantener la temperatura apropiada en el criadero porcino del barrio “La Delicia” del Cantón Salcedo.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Establecer los parámetros de funcionamiento del sistema de calefacción de suelo radiante hidráulico.
- Determinar los factores termodinámicos del ambiente y materiales óptimos a fin de preservar la subsistencia del ganado porcino.
- Analizar los resultados que genera el uso del sistema de calefacción de suelo radiante en los organismos de estudio a fin de denotar la validez del proceso aplicado.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN

2.1. Investigaciones previas

Una vez revisada y clasificada la información obtenida relacionada con el desarrollo del proyecto se revisaron los siguientes trabajos realizados:

Davy Alfonso Olivera Oliva, en su tesis previa la obtención del título de Ingeniero Mecánico presentada en la Universidad Católica del Perú, bajo el tema: “Diseño energético de un suelo radiante para una sala de 12 m^2 ubicada a 4 000 msm en Langui-Cuzco”, realizó un diseño que consistía en hacer circular por un serpentín agua previamente calentada por paneles solares de 150W, obteniendo una temperatura de 13 °C en el suelo de la habitación, mejorando notablemente las condiciones en el interior de la vivienda. [3]

Edwin Patricio Rodríguez Calva y Fernando Daniel Solís Córdova, en su tesis previa la obtención del título de Ingeniero Mecánico presentada en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, bajo el tema: “Diseño, construcción e instalación de un Sistema de Calefacción con energía solar”, implementaron un sistema de calefacción de suelo radiante diseñado de modo que el agua almacenada este a 55°C y circule por un serpentín de tubo de cobre obteniendo una temperatura de 16°C en el piso siendo apreciable el confort térmico obtenido. [4]

Rodrigo Alejandro Villarruel Cueva, en su tesis para optar al título de Ingeniero Constructor, presentada en la Universidad Austral de Chile, bajo el tema: “Calefacción por piso radiante para salón de eventos del Centro de ferias Parque Saval”, este diseño consistía en 15 serpentines de polietileno reticulado, con circulación de agua a 55°C obteniendo una temperatura en el interior de la sala de 17°C, temperatura óptima para las condiciones ambientales del lugar. [5]

Héctor Octavio Fanghanel Córdova, en su monografía para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista, presentada en la Universidad Veracruzana, bajo el

tema: “Sistemas de calefacción por suelo radiante”, cuyo diseño consistía en adecuar un calentador de agua a gas de 8 KW con una entrada de agua a una temperatura de 80°C y una temperatura a la salida del sistema de suelo de radiante de 24°C obteniendo una diferencia de temperaturas de 56°C, temperatura que se utiliza para calentar el piso radiante, concluyendo que este sistema es el más económico a largo plazo y el más eficiente. [6]

Ángel Remigio Aguilar Amangandi, en su tesis para optar al título de Ingeniero Mecánico presentada en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, bajo el tema: “Diseño de un sistema de climatización para el refugio del Chimborazo” concluye, que para sistemas de calefacción por suelo radiante es suficiente una temperatura media del agua de 40 a 45 °C. Al trabajar con una temperatura de agua baja, se reducen las pérdidas de calor en las conducciones generales, tuberías que enlazan la fuente de calor con los circuitos, y se puede producir el agua caliente mediante cualquier fuente de calor. [7]

2.2. Fundamentación legal

- Norma técnica Ecuatoriana NTE INEN 2506:2009 Eficiencia Energética En Edificaciones. Requisitos.
- Norma UNE-EN 1264 Sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua integrados en superficies. Suelo radiante: Métodos para la determinación de la emisión térmica de los suelos radiantes por cálculo y ensayo.
- Norma ASTM C-177 Método estándar de prueba para las mediciones del flujo de calor en estado estable por medio del aparato de placa caliente protegida.

2.3. Fundamentación teórica

2.3.1. Confort térmico

El confort térmico es un concepto subjetivo que expresa el bienestar físico y psicológico del individuo cuando las condiciones de temperatura, humedad y

movimiento del aire son favorables a la actividad que desarrolla [8]. Con base en la experiencia en el diseño de sistemas de aire acondicionado, se ha determinado que la mayoría de las personas se sienten en un estado confortable cuando la temperatura oscila entre 21-26°C, y la humedad relativa entre 30-70%. Estos valores se aplican cuando las personas están vestidas con ropa ligera, a la sombra y relativamente inactivas.

El exceso de calor, sea proveniente del ambiente o generado por el propio metabolismo, debe ser eliminado para mantener una temperatura constante en el cuerpo y asegurar el confort térmico.

En definitiva, las reacciones de confort o incomodidad térmica vienen dadas por las condiciones climáticas, por la producción de calor del metabolismo humano y por la transferencia de calor con el ambiente. Para una mejor comprensión de los requerimientos térmicos de las edificaciones debe estudiarse el balance térmico del cuerpo humano y de las edificaciones, así como las variables ambientales que participan en este proceso. [8]

El sistema de calefacción por suelo radiante es muy recomendable si de confort térmico se habla, por la constitución misma del sistema aporta variedad de ventajas la más importante de ellas es que la calefacción generada es mediante conducción y no utiliza corrientes de aire externas.

Como se muestra en la Figura 2.1 el sistema de calefacción es invisible puesto que el serpentín de calefacción está debajo del piso conduciendo el calor por medio del piso al interior del establecimiento, otra ventaja de este sistema es que trabaja a bajas temperaturas obteniendo así un mejor desempeño y sin molestar a los usuarios, pasando a ser un sistema recomendable debido a que sus parámetros de funcionamiento son los que se buscan dentro del concepto de confort térmico.

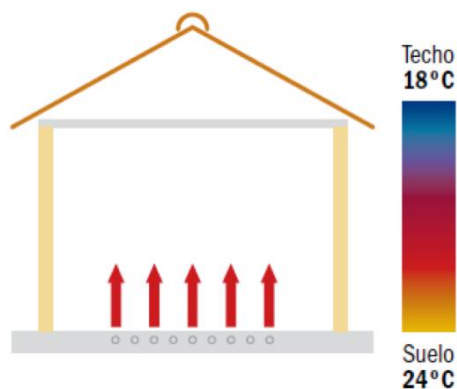


Figura 2. 1 Distribución de temperatura de suelo radiante

Fuente: pedrojhernandez.com/tag/confort/

2.3.2. Historia del suelo radiante

A partir del año 80 A.C. en Roma se comenzaron a calentar los espacios cerrados, haciendo circular por debajo del suelo y a través de chimeneas integradas en la estructura del edificio, el humo producido por la combustión de carbón o madera en un horno de modo que el calor se irradiase hacia el pavimento. Este tipo de calefacción, se denominaba hipocausto [9].

Este sistema ha ido evolucionando a lo largo del tiempo hasta convertirse en los actuales sistemas de climatización invisible por suelo radiante.



Figura 2. 2 Primeros hipocaustos

Fuente: www.sueloradiantebarcelona.com/

El suelo radiante de agua a baja temperatura es un sistema de calefacción muy evolucionado. Su funcionamiento en baja temperatura es ideal para garantizar un bienestar y un confort sin igual, además de un ahorro energético. [9]

El suelo radiante es el sistema de calefacción que menor consumo de energía presenta ya que por sus características se combina perfectamente con la energía solar térmica debido a las bajas temperaturas a las que trabajan. Es una calefacción limpia, invisible y silenciosa, ya que consiste en unas tuberías de agua caliente que circulan por debajo del suelo. [10]

2.3.3. Funcionamiento

La explicación de cómo funciona es muy sencilla, como se muestra en la Figura 2.3 consiste en un circuito de tubos, que se instalan debajo de una capa de mortero autonivelante, por donde circula agua caliente a una temperatura de entre 30 y 45°C. Como ya se mencionó anteriormente se trata del sistema de calefacción que emplea la temperatura de impulsión de agua más baja. [11]

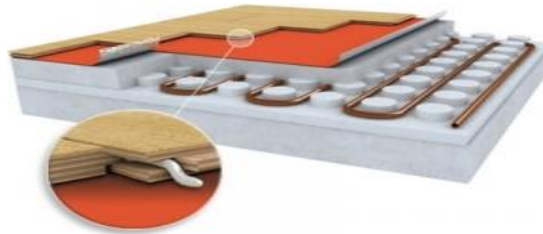


Figura 2. 3 Partes de un suelo radiante

Fuente: Manual técnico de suelo radiante Biofloor

Es un sistema de climatización que consta de diferentes elementos con características que garantizan la máxima eficiencia y calidad del sistema. Éste está compuesto por un panel aislante térmico que cumple con la función de minimizar las pérdidas caloríficas descendentes, al mismo se fija la tubería por donde se hace circular agua caliente, que cede su energía calorífica a una capa de mortero que se coloca por encima y alrededor del tubo. Dicha capa almacena la energía y ésta es cedida al pavimento de la vivienda, que a su vez la entrega al ambiente como lo muestra la Figura 2.4 [12].

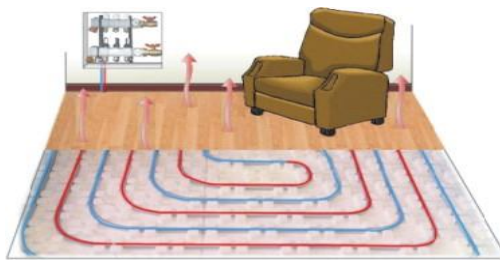


Figura 2. 4 Principio de funcionamiento

Fuente: www.ecoinnova.com/suelo-radiante/funcionamiento-del-suelo-radiante

Sensación de calor uniforme, económico y saludable, con el máximo confort. Si tenemos frío y encontramos una estufa, ¿qué intentamos calentar primero? Los pies, ya que en los pies se sitúan las terminaciones nerviosas de todo el cuerpo. Si los pies están calientes el resto del cuerpo está bien, al revés no pasa [13].

El suelo radiante es la tecnología de calefacción que sitúa el origen del calor debajo de nuestros pies, y que es muy recomendable para instalaciones de calefacción con energía solar.

La instalación del suelo radiante consiste en la colocación de tubos por debajo del suelo donde se pisa. En estos tubos circula agua caliente que calienta el suelo, el cual transmite este calor a la estancia, dando una sensación inigualable de confort.

Esta forma sencilla de calentar produce un ahorro de energía del 25-30%, ya que no se necesita calentar el techo para sentir una temperatura cómoda, como hacen los tradicionales sistemas de radiadores. Además produce un confort óptimo y uniforme ya que toda la estancia se calienta por igual, siguiendo el dicho del refranero “pies calientes, cabeza fría”. El suelo radiante favorece la salud, no reseca el ambiente, y al no existir convección de aire no se mueven las partículas de polvo e impurezas, mejorando la calidad del ambiente. Naturalmente, no provoca ni favorece la formación de “varices”, sino que es el único sistema de calefacción recomendado por la OMS.

Al ser un sistema invisible de calefacción, la instalación no quita espacio que sea necesario para la colocación de muebles, ni se ponen elementos que con el paso de

los años se vean anticuados. Evita las manchas de las paredes debidos a la convección del aire [13].

2.3.4. Ventajas

2.3.4.1. Perfil óptimo de temperaturas del cuerpo humano.

Realizando una comparación entre los diferentes sistemas de calefacción existentes, el suelo radiante es el que se ajusta de mejor manera al perfil óptimo de temperaturas del cuerpo humano. Según éste perfil la temperatura del aire a la altura de los pies es ligeramente superior a la temperatura del aire a la altura de la cabeza. Esto quiere decir que el usuario del sistema recibirá una mejor sensación de calor, entrando en un estado de confort térmico [14].

A continuación la Figura 2.5 muestra un esquema de la distribución vertical de temperaturas en función del sistema de calefacción:

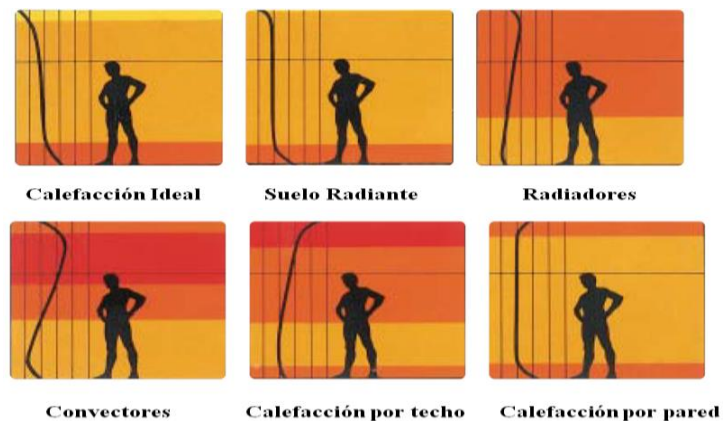


Figura 2. 5 Distribución de temperaturas diferentes sistemas

Fuente: Manual técnico de suelo radiante Uponor

2.3.4.2. Emisión térmica uniforme

En este sistema el aparato calefactor lo conforma toda el área del piso como lo indica la Figura 2.6. Esto da lugar a que la emisión térmica sea uniforme en toda la superficie. Gracias a esto se elimina la formación de zonas calientes y zonas frías que se obtiene con otros sistemas de calefacción en los cuales existe un número limitado de emisores de calor. [14]

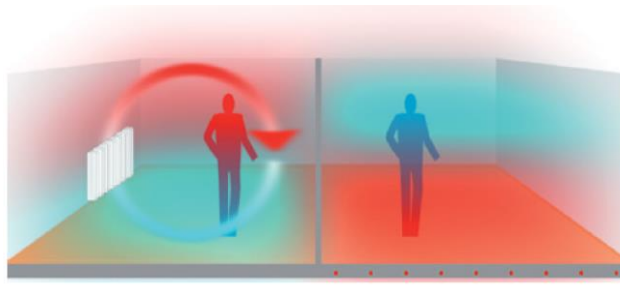


Figura 2. 6 Distribución de temperaturas en suelo radiante

Fuente: Manual técnico de suelo radiante Biofloor

2.3.4.3. Calefacción sin movimiento de aire

La velocidad de migración de las capas de aire caliente hacia las zonas frías es proporcional a la diferencia de temperaturas del aire entre ambas zonas, caliente y fría. Como la temperatura de la superficie emisora de un sistema de calefacción por suelo radiante es baja, esa diferencia de temperaturas del aire es muy reducida lo que origina que el movimiento de aire debido al sistema de calefacción sea imperceptible. Una ausencia de movimiento de aire produce menor movimiento de polvo y un entorno más higiénico y saludable. [14]

2.3.4.4. Ahorro energético

Al calefactar mediante otros sistemas se necesitan temperaturas mayores para llegar a la requerida por el usuario, lo que da como resultado un mayor gasto energético, por el contrario para la misma sensación térmica sentida la temperatura ambiente interior en un sistema de calefacción por suelo radiante es comparativamente menor.

Al ser menor la temperatura ambiente interior también son menores las pérdidas energéticas (perdidas por cerramientos, por ventilación y por infiltración) ya que estas son proporcionales a la diferencia de temperaturas entre el exterior del local y el interior.

Otro factor importante de ahorro energético lo constituyen la disminución de pérdidas de calor en sala de calderas y en las conducciones hasta los colectores debido a la menor temperatura del agua de impulsión y retorno en comparación con otros sistemas de calefacción. [14]

2.3.4.5. Compatible con casi cualquier fuente de energía

La moderada temperatura de impulsión de agua que necesita el sistema hace que éste sea compatible con casi cualquier fuente energética (electricidad, combustibles derivados del petróleo, energía solar, carbón, gas natural, etc.). En particular, es el único sistema de calefacción que puede ser alimentado energéticamente por paneles solares térmicos. [14]

2.3.4.6. Calefacción invisible

Es un sistema de calefacción que ofrece una total libertad de decoración de interiores debido a que los emisores de calor no son visibles, el espacio habitable es mayor al no existir dentro de este, elementos calefactores visibles y desaparece el riesgo de golpes o quemaduras por contacto con ellos. [14]

2.3.4.7. Compatible con cualquier tipo de suelos

Debido a que la temperatura generada es baja este tipo de calefacción por suelo radiante se instala con cualquier tipo de pavimento.

2.3.5. Elementos constitutivos

A continuación la Figura 2.7 muestra las diferentes partes por las que está formado un sistema de suelo radiante.

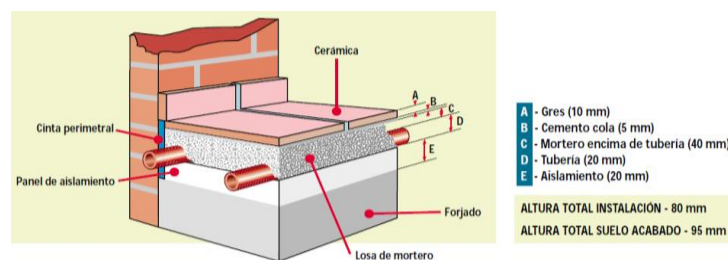


Figura 2. 7 Elementos de suelo radiante

Fuente: Manual técnico de suelo radiante BARBI

2.3.5.1. El Forjado

Es la base del suelo radiante, esta se puede conformar por una losa de mortero o dependiendo de la ubicación el forjado se lo hace en el suelo nivelado.

2.3.5.2. Panel de Aislamiento

El aislamiento térmico del sistema. Es imprescindible en cualquier instalación de calefacción de suelo radiante. Para ello se utilizan paneles aislantes sobre los que se instalan las tuberías. Éstos paneles, pueden ser moldeados, sujetando los circuitos y facilitando su tendido con la separación entre tubos proyectada. [11]

Este panel evita que el calor generado por la tubería descienda, sino que cumple la función de aislar el calor y la mayor temperatura sea conducida al mortero y luego al ambiente a calefactar.

Los materiales utilizados para el aislamiento de calor son muy variados, en la mayoría de instalaciones de suelo radiante se utiliza materiales poliméricos y fibras compuestas como lo son: el poliuretano, la lana de vidrio, el poliestireno, y el polipropileno, en nuestro caso se utilizará láminas aglomeradas de cascarilla de arroz.



Figura 2. 8 Cascarilla de arroz

Fuente: www.granosloschapeteados.com/cascara-de-arroz.html

En comparación con la conductividad térmica de los materiales antes mencionados la cascarilla de arroz es un material con una conductividad térmica muy baja como se

muestra en la Tabla 2.1, costo relativamente bajo y con una ventaja que es un material natural, razón por la cual se utilizara como aislante térmico bioecológico.

Tabla 2. 1 Comparación de la conductividad térmica de la cascarilla de arroz y algunos aislantes comerciales

Material	K (W/m° K)
Lana mineral	0,0303
Poliestireno expandido	0,0330
Cascarilla de arroz	0,0360
Fibra de vidrio	0,0380
Corcho aglomerado	0,0450

Fuente: Tesis estudio de la variación en la conductividad térmica de la cascarilla de arroz aglomerada con fibras vegetales.

2.3.5.3. Cinta perimetral

Es una banda de espuma de polietileno el objetivo principal de ésta cinta, es absorber las dilataciones que produce el mortero de cemento que se coloca sobre los tubos emisores, debido al proceso de calentamiento/enfriamiento. Otro factor importante de la banda perimetral es que genera un aislamiento lateral del sistema. Se fija a las paredes de todas las áreas a calefactar, desde el suelo base hasta la cota superior del pavimento. [11]

2.3.5.4. Lámina de polietileno

Es una barrera antihumedad entre el suelo base y la superficie emisora de suelo radiante, ésta se coloca encima del suelo base de forma que evita el ascenso por capilaridad de humedades. Se suele instalar cuando existe riesgo de humedad en el fundido y revestimiento. Algunas veces viene incorporado en el panel aislante. [11]

La protección contra la humedad es muy importante en éste sistema de calefacción, debido a que se debe proteger a la lámina de aislamiento ya que si ésta se deteriora el calor generado por la tubería se perderá hacia el inferior, necesitando una mayor generación de energía para calentar la superficie de suelo radiante.



Figura 2. 9 Lámina de polietileno

Fuente: www.lacasadeltechado.com.ar/polietilenos.html

2.3.5.5. Tubería

2.3.5.5.1. Tubería de cobre

El cobre, por sus características, es sin duda el metal más apropiado para la fabricación de tubos para toda clase de aplicaciones, tanto en la construcción como en la industria. [15]



Figura 2. 10 Tubos de cobre

Fuente: <http://www.redimac.com.mx/tuberia-y-conexiones/tubo-de-cobre/>

Este tipo de tubería cuenta con extraordinarias propiedades térmicas, debido a su alta conductividad térmica transfiere el calor de forma instantánea disminuyendo el tiempo de calefacción de la tubería y haciendo más eficiente la transferencia de calor hacia el mortero, en la Tabla 2.2 se muestran las propiedades físicas de la tubería de cobre.

Tabla 2. 2 Características del cobre

Densidad	8,92 kg/dm ³
Temperatura de fusión	1083 °C
Conductividad térmica a 20 °C	293-364 W(mK)
Conductividad eléctrica a 20 °C	41-52 m/ohm /mm ²
Coefficiente de dilatación lineal	16,5 x 10 ⁻⁶
Calor específico de 0-100 °C	0,092 cal/g °C
Resistividad eléctrica a 20 °C	0,022 ohm mm ³ /m
Coefficiente térmico de resistencia por °C	0,00393
Reacción al fuego(según código europeo Euroclases	Clase A1 no inflamable
Módulo de elasticidad a 20 °C	12000 kg/mm ²

Fuente: Manual técnico de tubos y accesorios de cobre. CEDIC.

Características

- Alta resistencia a la corrosión.
- Debido a una superficie interior lisa produce perdidas de carga pequeñas.
- Características físicas y químicas inalterables con el paso del tiempo
- Permite montajes rápidos y fáciles, utilizando accesorios, o utilizando soldados a compresión, uniones en frío y en caliente.

- Compatible con la mayoría de los materiales de construcción habituales y de los fluidos a transportar.
- Soporta elevadas presiones interiores, permitiendo el uso de tubos de pared delgada.

2.3.5.5.2. Tubería de polietileno reticulado

Estas tuberías son mangueras flexibles compuestas de dos capas de polietileno cruzado, separadas de una capa de aluminio. Aguantan temperaturas y presiones suficientemente altas para una red de agua (hasta 100°C, y hasta 20 kg/cm² de presión). [20]



Figura 2. 11 Tubos de polietileno

Fuente: www.acsisplanet.com

Se descomponen en 3 tipos según su uso:

- Tubería azul para conducción de agua fría. -40°C a +60°C
- Tubería roja para conducción de agua caliente. -40°C a +99°C
- Tubería negra para conducción de agua fría o caliente con resistencia a la intemperie. -40°C a +99°C

Este tipo de tubería tiene las siguientes ventajas:

- Baja conductividad térmica en relación al cobre, limitando las pérdidas de calor.
- Instalación sencilla y rápida debido a su flexibilidad.

- No requiere accesorios para curvaturas.
- Disminuye el uso de conexiones.
- Es ligero y fácil de transportar, disminuyendo tiempo y costo de instalación.
- La caída de presión es menor debido a que las curvas son muy abiertas.
- Sufre mínima incrustación de sarro.
- Elimina la posibilidad de fugas.
- Elimina efectos de golpe de ariete.
- Rastreable con detector de metales.
- Evita los efectos del par galvánico.
- Durable (garantía limitada por 50 años)
- No sufre corrosión



Figura 2. 12 Tubos de polietileno

Fuente: www.acsisplanet.com

2.3.5.5.3. Tipos de circuitos

Para el diseño de un sistema por suelo radiante es necesario, en primer lugar, obtener la potencia necesaria en cada superficie a climatizar, para ello es necesario conocer las propiedades de transmisión de calor de cada uno de los componentes del piso, orientaciones y superficie. Una vez resuelto el cálculo de la demanda térmica, seleccionamos la distancia entre tubos, más apropiada en función del tipo de suelo y la temperatura de impulsión a los circuitos.

Para lograr que la transmisión de calor sea uniforme, la tubería debe cubrir toda la superficie de los locales, exceptuando los lugares donde estarán ubicados armarios, debajo de bañeras en los cuartos de baño. En zonas donde hay mayores pérdidas de calor es aconsejable disminuir la distancia entre tubos, como puede ser superficies acristaladas importantes.

Para una distribución homogénea de temperaturas en los locales a climatizar existen diferentes formas de diseñar los circuitos de circulación, de forma que se optimice el aporte de calor al sistema en función de las dimensiones de la habitación. [16]

La configuración en doble serpentín como lo muestra la Figura 2.13 consiste en que las tuberías de impulsión y retorno se disponen en paralelo. Esta configuración proporciona una temperatura media uniforme.

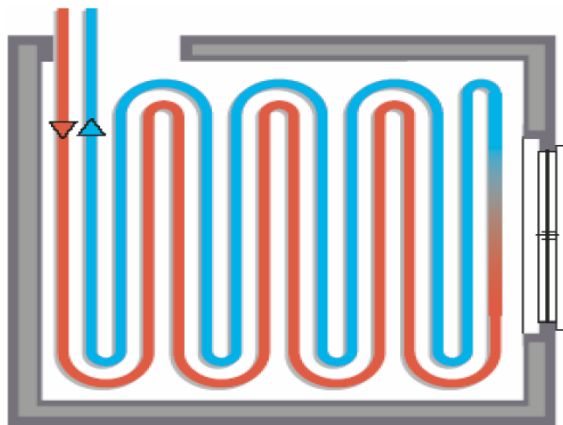


Figura 2. 13 Configuración en doble serpentín

Fuente: Manual técnico Biofloor

En la Figura 2.14 se muestra el diseño en espiral ésta configuración es básicamente una variante de la configuración en doble serpentín, la mejor distribución de calor se consigue con la instalación de una espiral.

Tiene como ventaja que las curvas son menos pronunciadas, lo que facilita la instalación sobre todo cuando las tuberías emisoras son de mayor diámetro exterior. [16]

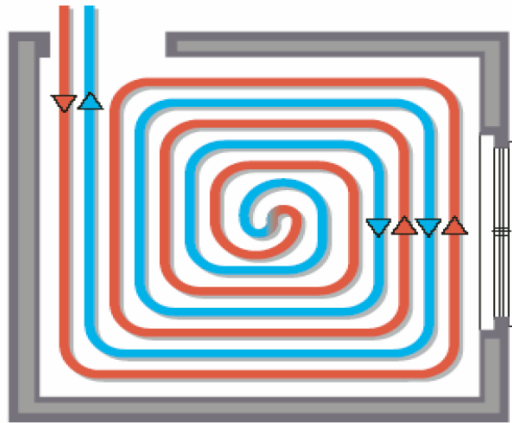


Figura 2. 14 Configuración en espiral

Fuente: Manual técnico Biofloor

2.3.5.6. Mortero

Los morteros son mezclas plásticas obtenidas con un aglomerante, arena y agua, que sirven para unir las piedras o ladrillos que integran las obras de fábrica y para revestirlos con enlucidos.

Luego de instalar cada uno de los circuitos, se vierte la mezcla de cemento sobre toda la superficie calefactable. El espesor recomendable es de 5 cm medidos a partir de la de la parte inferior de la tubería. Es muy importante añadir un aditivo para fraguado al agua de amasado de la mezcla de mortero, para conseguir un contacto correcto con las tuberías emisoras, evitando inclusiones de aire, que aumentarían la resistencia térmica del sistema. [11]

2.3.5.7. Grupo de impulsión

Los colectores, en una instalación de suelo radiante cumplen la función de obtener varios circuitos derivados partiendo de uno principal. En cada zona a calentar es necesario que siempre exista un colector de impulsión y uno de retorno. Dentro de una misma instalación podrán existir varias zonas, incorporando cada una de ellas un conjunto colector de impulsión y colector de retorno. [14]

2.3.5.8. Sistema de regulación

Una vez terminada la instalación del suelo radiante, se procederá a instalar los elementos que ayudarán con la regulación. El suelo radiante es un sistema de calefacción basado en el concepto de inercia térmica, lo que lo hace muy propenso a sufrir perturbaciones por variaciones de la climatología. Tampoco es conveniente dejar enfriar la losa de mortero, puesto que ello repercute negativamente en el consumo energético de la instalación. [14]

2.3.5.9. La fuente de calor

En general se trata de una caldera convencional que se encarga de calentar el agua de la vivienda, tanto de la instalación de calefacción de suelo radiante como del agua caliente sanitaria de la cocina y de los cuartos de baño. [19]

2.3.5.9.1. Calefones

Estos dispositivos calientan el agua de una forma inmediata, su utilización más habitual es en el hogar y en las industrias, ya sea para calentar el agua de duchas, cocinas y sistemas de calefacción. A nivel industrial se los utiliza para generar vapor de agua.



Figura 2. 15 Calefón a gas

Fuente: Manual técnico Peisa

Existen dos tipos principales de calefones, estos son los eléctricos y los a gas, siendo los mas eficientes los de gas puesto que consumen menor cantidad de combustible a diferencia de los eléctricos que al estar conectados a la red tienden a consumir mayor energía y por ende la factura por electricidad tiene un monto mayor.

Para el presente proyecto se ha elegido un calefón marca LYM de 6 litros de capacidad como fuente de calor, siendo una excelente opción puesto que no requerimos temperturas demasido altas.

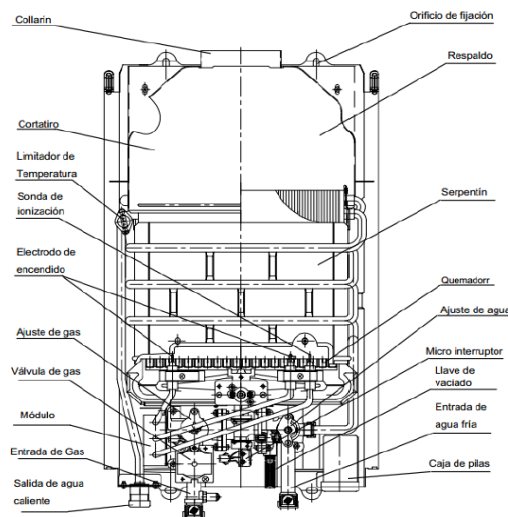


Figura 2. 16 Partes de un calefón

Fuente: Manual técnico Peisa

El motivo por el cual se seleccionó un calefón como fuente de calor es que es un equipo muy fácil de regular optando por varias temperaturas con solo regular la intensidad de la llama, otra ventaja es su bajo costo en relación a calderas e intercambiadores de calor.

2.4. Mecanismos de transferencia de calor

2.4.1. Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o

gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio.

En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una red y al transporte de energía por parte de los electrones libres.

La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él.[17]

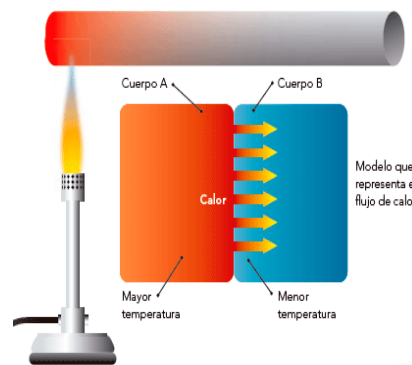


Figura 2. 17 Conducción de calor

Fuente: <https://conducciondelcalor.wordpress.com/2013/03/20/conduccion-del-calor-y-su-aprovechamiento/>

Para determinar la cantidad de calor que se conduce de un material a otro se utiliza la siguiente fórmula:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} [W] \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Dónde:

K= Coeficiente de conductividad térmica del material (W/m °C)

A= Área de la superficie de transferencia de calor. (m^2)

ΔT = Variación de temperaturas final menos inicial (°C)

Δx = Espesor de la superficie de transferencia (m)

2.4.1.1. Conductividad térmica

La conductividad térmica de un material se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un aislante. [17]

2.5. Confort térmico porcino

El confort térmico se traduce como la corrección de las condiciones externas y circunstancias que afectan la salud, el bienestar, la productividad y eficiencia reproductiva de un animal. Éste concepto incluye todos los factores que se encuentran alrededor de los animales y que de cierto modo los afectan, tales como el manejo, la nutrición, aspectos sociales y las enfermedades. Incluye también factores climáticos como temperatura, humedad y ventilación, que deben ser manejados apropiadamente o modificados si resulta práctico [18].

El control de la temperatura en los locales de crianza de cerdos es muy importante, debido a que este factor ambiental afecta en gran medida el desempeño de la granja y la crianza del animal.

De acuerdo con estudios realizados la ingesta de alimentos en los cerdos está ligada directamente a la temperatura a la cual este se encuentra, por esta razón si el cerdo empieza a aumentar la ingesta de alimento es porque el ambiente está demasiado frío y si empieza a comer muy poco es que el ambiente se torna demasiado caluroso, por esta razón el lugar donde se cría los cerdos debe estar bajo condiciones controladas de temperatura.

El manejo de las condiciones ambientales dentro del edificio es muy importante para optimizar del rendimiento. La temperatura y humedad ideal estimulan el consumo de

alimento, evite el exceso de calorías usadas para mantener la temperatura corporal y reducir la aparición de enfermedades. [18]

Principales Factores a Controlar:

- Temperatura del aire
- Nivel de humedad
- Uniformidad en la temperatura del aire
- Velocidad del aire a través de los animales
- Polvo en suspensión y nivel de organismos patógenos
- Concentraciones de olor y gas
- Humo de combustión de los calentadores sin ventilación
- Condensación de humedad en las superficies

De acuerdo con la condiciones requeridas para un corral de crianza de cerdos, el sistema de calefacción de suelo radiante es una opción adecuada, debido a que las temperaturas requeridas son bajas y se ahorraría energía, otra ventajas es que como el sistema va debajo del piso no habría molestia y malestar para el animal, no hay molestia con partículas en suspensión, y no requiere de corrientes de aire [18].

Por estas razones el sistema de climatización de suelo radiante es una buena opción de implementación para la crianza porcícola.

2.5.1. La temperatura en ganado porcino

Los cerdos únicamente se encuentran a gusto cuando la temperatura de las naves se mantiene estable dentro de unos límites muy estrechos, así, las variaciones de la temperatura óptima superiores a 5°C en un periodo de 24 horas tienen un efecto más estresante que el aire algo más frío pero constante. Los lechones son especialmente sensibles a descensos de temperatura por debajo del óptimo, mientras que los cerdos de cebo y de cría lo son a temperaturas elevadas. [19]

En las tablas 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, y 2.8 se muestran las temperaturas óptimas a las que se debe mantener los cerdos de acuerdo a cada una de las etapas de crianza en la que se encuentran.

2.5.1.1. Temperaturas de los corrales al momento de nacimiento de acuerdo al tipo de suelo.

Tabla 2. 3 Temperaturas optimas de acuerdo al tipo de suelo

Tipo de suelo	T óptima (°C)
Emparillado total	24
Suelo aislado	21
Paja	17

Fuente: Manual de bioseguridad Agrocalidad

2.5.1.2. Temperaturas criticas inferiores y superiores de acuerdo al peso del cerdo.

Tabla 2. 4 Temperaturas criticas de acuerdo al peso del cerdo

Peso (Kg)	T critica inferior (°C)	T critica superior (°C)
20	21	27
30	20	26
60	17	23
110	16	22

Fuente: Manual de bioseguridad Agrocalidad

2.5.1.3. Temperaturas del local luego de 21 semanas de separar de las madres.

Tabla 2. 5 Temperaturas optimas luego de destete

Semana	T crítica inferior (°C)	T óptima (°C)	T crítica superior (°C)
1	28	28	32
2	27	27	31
3	24	26	31
4	22	25	30
5	20	25	28
6	19	24	27
7	18	24	26

Fuente: Manual de bioseguridad Agrocalidad

2.5.1.4. Temperaturas óptimas para cerdas en gestación

Tabla 2. 6 Temperaturas óptimas para cerdas en gestación

Tipo de alojamiento	T crítica inferior (°C)	T óptima (°C)	T crítica superior (°C)
Cerdas en jaulas sobre emparillados	20-23	23	28
Cerdas en grupo sobre emparillados	16	21-22	28
Cerdas en grupo sobre camas de paja abundante		17-18	

Fuente: Manual de bioseguridad Agrocalidad

2.5.1.5. Temperatura general en corrales en la etapa de maternidad

Tabla 2. 7 Temperaturas óptimas para cerdas madres

	T óptima (°C)		
	Paja	Emparrillado parcial	Emparrillado total
Semana de parto	18	20	22
Semana de destete	15	17	19

Fuente: Manual de bioseguridad Agrocalidad

2.5.1.6. Temperaturas en nidos de nacimiento

Tabla 2. 8 Temperaturas óptimas para nidos de nacimiento

	T crítica inferior (°C)	T óptima (°C)
Al nacimiento	32	32-35
Al destete	26	26-28

Fuente: Manual de bioseguridad Agrocalidad

En base a estos datos obtenidos bibliográficamente se procederá a diseñar el sistema de calefacción de suelo radiante para mantener temperaturas que estén dentro del confort térmico del ganado porcino.

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN

3.1. Diseño del circuito hidráulico

Como se muestra en la figura 3.1 el área para suelo radiante cuenta con una superficie de 5,5 m² siendo solo una porción del local donde habitan los organismos de estudio, la razón por la cual se genera calor solo en este espacio es debido a que en el área de comedero el alimento debe permanecer frío y el área libre de calor es utilizada para que dichos organismos realicen sus necesidades biológicas [18].

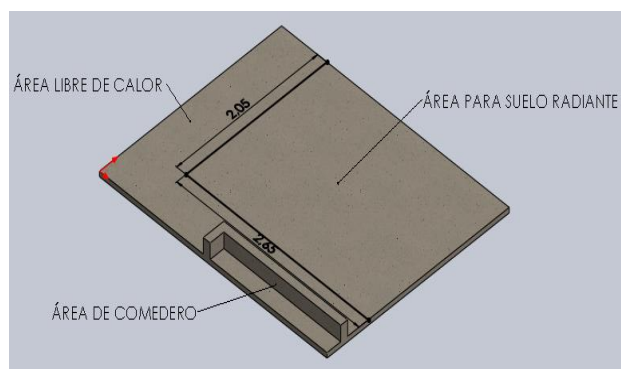


Figura 3. 1 Distribución del piso del corral

Fuente: Autor

Tomando en cuenta la geometría del piso donde se va a instalar el sistema de suelo radiante, se eligió el diseño de un serpentin en espiral como se muestra en la figura 3.2, debido a que este tipo de diseño es recomendable para superficies totalmente homogéneas y teniendo como ventaja que las tuberías de ida y de retorno siempre son contiguas, además el diseño en espiral es el que mejor distribuye el calor, siendo uno de los circuitos más eficientes [14].

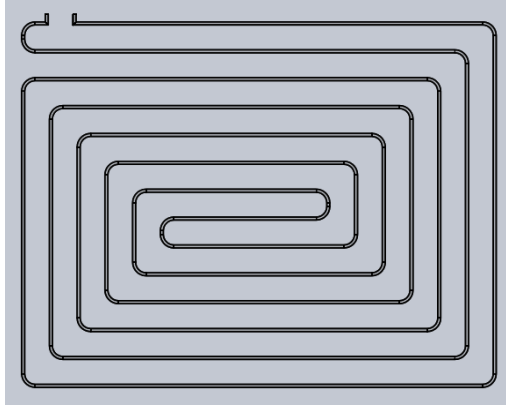


Figura 3. 2 Serpentín

Fuente: Autor

Para el diseño del serpentin la distancia entre tubos o también denominado paso según [14] las separaciones van desde los 15 cm hasta los 24 cm para sistemas tradicionales de suelo radiante, lo habitual es de 20 cm, y de 30 cm para sistemas con renovación, excepto en baños que se utiliza una separación de 10 cm.

El presente diseño es un sistema tradicional sin renovación por lo cual se eligió una distancia entre tubos de 15 cm, ayudando a una distribución de calor uniforme tal como lo recomiendan fabricantes de suelo radiante como: [12], [16] y [19].

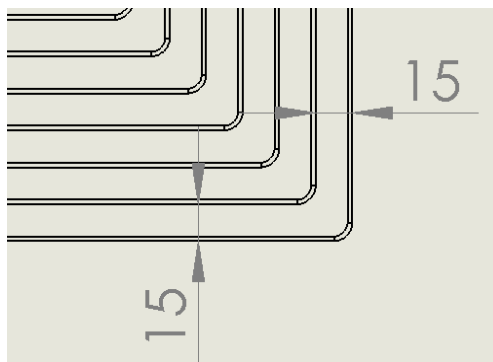


Figura 3. 3 Paso entre tubos

Fuente: Autor

Para el cálculo de la longitud total de la tubería se utilizó la siguiente relación:

$$L = \frac{A}{p} + 2l \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Dónde:

L : Longitud de la tubería para el circuito de suelo radiante (m)

A : Área a calefactar (m^2)

p : Paso entre tubería (m)

l : Distancia desde el sistema de impulsión hasta el piso radiante (m)

Como se indicó en la Figura 3.1 el área para calefacción cuenta con un largo de 2,65 m y un ancho de 2,05 m por lo que el área de calefacción es de $5,5 m^2$, también se conoce el paso de 15 cm, la distancia en donde se va a colocar el calentador de agua está a una distancia de 1,5 m con estos datos se calcula la longitud de tubería necesaria.

$$L = \frac{5,5 m^2}{0,15m} + 2(1,5)$$

$$L = 39,7 m$$

$$L \cong 40 m$$

3.2. Selección de la tubería

Una vez obtenida la longitud de tubería necesaria para el circuito se realizó una comparación de los costos que implica la instalación de una tubería de cobre y de una de polietileno, como se muestra en las Tablas 3.1 y 3.2 se eligió estos dos tipos de tubería debido a que cuentan con buenas características térmicas e ideales para el sistema de suelo radiante.

Se seleccionó tubería de diámetro de 1/2 pulgada debido a que es una de la medidas más utilizadas en todo tipo de instalación ya sea de agua caliente o de agua fría, siendo más fácil de conseguir en el mercado y contando con buenas características

térmicas, además los componentes de unión como válvulas, codos, uniones son mas económicos a comparación de medidas mayores.

3.2.1. Cañería de cobre

El cobre es un material con una excelente conductividad térmica e ideal para sistemas de calefacción y refrigeración, la desventaja de utilizar tubería de este material implica una inversión inicial significativa, por su rigidez implica costos adicionales para su tendido, mano de obra, doblado o soldado en las partes curvas del serpentín y además por su alta conductividad térmica se producen pérdidas de calor innecesarias que implicaría un desperdicio de energía.

Tabla 3. 1 Costos cañería de cobre

Cañería de cobre 1/2 pulg			
Tipo	Unidades	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Tubería	40	5.7	228
Mano de obra	2	10	20
Doblado	30	0.5	15
Costo total			263

Fuente: Autor

3.2.2. Tubería flexible de polietileno

El polietileno a diferencia del cobre no cuenta con una conductividad térmica muy alta debido a que es un material polimérico, el sistema de suelo radiante es uno de los más recomendables por su ahorro de energía al trabajar a bajas temperaturas es por esta razón que la tubería de polipropileno vendría a ser una excelente opción para la construcción del serpentín, ya que una de sus mayores ventajas sería su bajo costo en relación a la tubería de cobre y por no necesitar temperaturas muy altas no sufrirá ningún desperfecto, además que para su tendido no habrá complicaciones como en la tubería de cobre.

Tabla 3. 2 Costos tubería de polietileno

Tubería flexible de polietileno 1/2 pulg			
Tipo	Unidades	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Tubería	40 (m)	1.6	64
Mano de obra	2	10	20
Grapas de sujeción	50	0.05	2.5
Costo total			86.5

Fuente: Autor

Como se puede apreciar en las tablas 3.1 y 3.2 el costo de la tubería de cobre es muy alto en comparación con la de polietileno, por esta razón y tomando en cuenta que el sistema de suelo radiante que se va a instalar es un modelo de prueba, se seleccionó una tubería de ½ pulgada de polietileno, la misma que cumple con las características necesarias para el sistema planteado.

3.3. Cálculo de la carga térmica

Los datos para determinar la carga térmica necesaria se han obtenido de las recomendaciones de fabricantes, como [14] que recomienda que el agua debe estar en un rango de 40-45 °C para el sistema de suelo radiante y de manuales técnicos de crianza de ganado porcino como [18] que recomienda una temperatura de 32-35 °C para el local al momento del nacimiento, la Tabla 3.3 muestra los datos que ayudarán a diseñar el sistema bajo características de confort térmico.

Tabla 3. 3 Temperaturas de diseño

Datos de diseño	
T. piso radiante	32 °C
T. del agua	45 °C
Piso de cemento	1,4 W/m°C
	Espesor= 0,05 m

Fuente: Autor

Con estos datos y con ayuda de la siguiente relacion se procede al cálculo de la carga térmica del local a calefactar:

$$q = KS(T_1 - T_2) \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Dónde:

q : Carga térmica (W)

K : Conductividad térmica del material (W/m°C)

S : Factor de forma conductivo (m)

T_1 : Temperatura de la superficie caliente (°C)

T_2 : Temperatura de la superficie fría (°C)

Para el cálculo del factor de forma se utilizó la fórmula para un sistema con un cilindro isoterma de radio r inmerso en un medio semi-infinito cuya superficie es una isoterma tal como se muestra en el Anexo B.

$$S = \frac{2\pi L}{\ln(D/r)} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Dónde:

S : Factor de forma (m)

L : Longitud de la tubería (m)

D : Distancia desde la superficie hasta la mitad del tubo (m)

r : Radio de la tubería (m)

Los datos de la tubería se tabulan a continuación:

Tabla 3. 4 Datos de diseño

Longitud	40 m
Diámetro	0,013 m
Espesor del mortero	0,05 m

Fuente: Autor

$$S = \frac{2\pi(40m)}{\ln(0,05m/0,0065m)}$$

$$S = 123,19 \text{ m}$$

Reemplazando el valor del factor de forma y los datos de diseño de la tabla 3.3 se obtiene la carga térmica:

$$q = 1,4 \frac{W}{m^{\circ}C} * 123,19 \text{ m} * (45 - 32)^{\circ}C$$

$$q = 2242,1 \text{ W}$$

3.4. Cálculo del caudal de agua

Primero se fijó un salto térmico de 10 °C tal como lo recomienda [14] para un sistema tradicional de suelo radiante, con los valores antes obtenidos y los datos del anexo C, se procede a calcular la cantidad de agua que circulara por el serpentín.

Tabla 3. 5 Valores para cálculo de caudal

Salto térmico	10 °C
Cp del agua a 50 °C	4,18 KJ/Kg °C

Fuente: Autor

$$q = \dot{m}C_p\Delta T$$

Ecuación 3.4

Dónde:

q : Carga térmica (KJ/s)

\dot{m} : Flujo másico de agua (Kg/s)

ΔT : Salto térmico temperatura a la entrada – temperatura a la salida (°C)

$$2,2421 \frac{KJ}{s} = \dot{m} * \frac{4,18KJ}{Kg^{\circ}C} * 10^{\circ}C$$

$$\dot{m} = 0,054 \frac{Kg}{s}$$

Por lo tanto el caudal necesario para el sistema es de 3,24 lt/min.

3.5. Selección del grupo de impulsión

Para la selección de la bomba se procedió a calcular las pérdidas de energía tanto en accesorios como pérdidas por fricción y para eso se utilizó la ecuación de la continuidad:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1}{2g} + Z_1 + h_B - h_T = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2}{2g} + Z_2 \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Dónde:

P_1, P_2 : Presiones en la succión y la descarga (N/m²)

V_1, V_2 : Velocidades en la descarga y en la succión (m/s)

γ : Peso específico del líquido a transportar (N/m³)

g : Aceleración de la gravedad (9.8 m/s²)

h_B : Energía de la bomba (m)

h_T : Pérdidas por fricción más pérdidas por accesorios (m)

Para el sistema analizado el tanque de succión y el de descarga viene a ser el mismo por lo tanto:

$$P_1, P_2 = 0$$

$$V_1, V_2 = 0$$

$$Z_1 + h_B - h_T = Z_2$$

Y despejando h_B se obtiene:

$$h_B = Z_2 - Z_1 + h_T$$

$$h_T = h_f + h_l \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Dónde:

h_f : Pérdidas por fricción (m)

h_l : Pérdidas por accesorios (m)

3.5.1. Cálculo de pérdidas por fricción

Las pérdidas por fricción son aquellas que se originan a lo largo de la tubería de sección y de descarga debido al rozamiento del fluido con la superficie interna de la tubería, dichas pérdidas se calculan de la siguiente forma:

$$h_f = f x \frac{L_e}{D} x \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Dónde:

h_f : Pérdidas por fricción en la tubería (m)

f : Factor de fricción (adimensional)

L_e : Longitud de la tubería (m)

D : Diámetro interior de la tubería (m)

V : Velocidad del fluido (m/s)

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

$$Q = AV \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Dónde:

Q : Caudal a transportar (m^3/s)

A : Área interior de la tubería (m^2)

V : Velocidad del fluido (m/s)

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{5,4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{6,36 \times 10^{-5} \text{ m}^2}$$

$$V = 0,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$N_R = \frac{VD}{\gamma} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Dónde:

N_R : Numero de Reynolds

V : Velocidad del fluido (m/s)

D : Diámetro de la tubería (m)

γ : Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

$$N_R = \frac{0,9 \frac{m}{s} \times 0,009 m}{6 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}}$$

$$N_R = 13500$$

Como se observa el valor del número de Reynolds es mayor a 4000 por lo tanto el flujo es turbulento y se aplica la fórmula de Shuam para calcular el factor de fricción.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \left(\frac{D}{\epsilon} \right)} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Ecuación 3.10

Dónde:

f : Factor de fricción (adimensional)

N_R : Número de Reynolds (adimensional)

D : Diámetro de la tubería (m)

ϵ : Rugosidad de la tubería (m)

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \left(\frac{0,009}{3 \times 10^{-7}} \right)} + \frac{5,74}{13500^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \left(\frac{0,009}{3 \times 10^{-7}} \right)} + \frac{5,74}{13500^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f = 0,028$$

$$h_f = 0,028 \times \frac{45 \text{ m}}{0,009 \text{ m}} \times \frac{0,9^2 \text{ m}^2/\text{s}^2}{2(9,8 \text{ m}/\text{s}^2)}$$

$$h_f = 5,77 \text{ m}$$

3.5.2. Cálculo de pérdidas por accesorios

Este tipo de pérdidas aparecen cuando el circuito hidráulico cuenta con codos, válvulas, uniones, etc. Elementos que causan una disminución de energía en el fluido.

$$h_l = Kx \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Dónde:

h_l : Pérdidas de carga por accesorios (m)

K : Coeficiente de resistencia (adimensional)

V : Velocidad del fluido (m/s)

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

$$K = f_T x (Le/D) \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Dónde:

K : Coeficiente de resistencia (adimensional)

(Le/D) : Relación de longitud equivalente (adimensional)

f_T : Factor de fricción de la tubería

$$K_{\text{codos a } 90^\circ \text{ radio largo}} = 0,027 \times 20$$

$$K_{\text{codos a } 90^\circ \text{ radio largo}} = 0,54$$

$$K_{\text{codos a } 90^\circ \text{ estandar}} = 0,027 \times 30$$

$$K_{\text{codos a } 90^\circ \text{ estandar}} = 0,81$$

$$K_{\text{valvula de mariposa}} = 0,027 \times 45$$

$$K_{\text{valvula de mariposa}} = 1,22$$

$$h_l = \frac{V^2}{2g} (6K_{\text{codos a } 90^\circ \text{ estandar}} + 35K_{\text{codos a } 90^\circ \text{ radio largo}} + K_{\text{valvula de mariposa}})$$

$$h_l = \frac{0,9^2}{2(9,8)} (6(0,81) + 35(0,54) + 1,22)$$

$$h_l = 1,03 \text{ m}$$

Por lo tanto el valor de pérdidas por fricción y accesorios en la tubería es:

$$h_T = 5,77 \text{ m} + 1,03 \text{ m}$$

$$h_T = 6,80 \text{ m}$$

El valor mínimo de impulsión de la bomba sería:

$$h_B = Z_2 - Z_1 + h_T$$

$$h_B = 0,345 - 0,085 + 6,80$$

$$h_B = 7,23 \text{ m}$$

3.5.3. Cálculo de la potencia de la bomba

$$P = h_B \gamma Q \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Dónde:

P : Potencia necesaria de la bomba (W)

γ : Peso específico del fluido (KN/m³)

Q : Caudal que circula por la tubería (m³/s)

$$P = 7,23 \text{ m} \times 9,50 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 5,4 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$P = 3,7 \text{ W}$$

Por lo tanto se selecciona una bomba marca Milano de 5-40 m de altura de impulsión con una potencia de 0,35 KW. Tal como se muestra en el Anexo L.

3.6. Selección de la fuente de calor

Como se indicó anteriormente el caudal que va a circular por el serpentín del sistema de suelo radiante es de 3,24 lt/min, por lo tanto se selecciona un calefón marca LYM con una capacidad de 6 lt (anexo K) y con regulador de temperatura equipo que será suficiente para el buen funcionamiento del sistema de suelo radiante.

3.7. Selección del aislante

En un proyecto de suelo radiante la parte más importante es el aislamiento del calor generado, se debe procurar que la mayor parte de la energía que brinda el agua caliente se transmita al piso radiante y no hacia el inferior de las tuberías, uno de los

materiales que se van a utilizar en el presente proyecto es la cascarilla de arroz aglomerada con resina.

La razón por la cual se eligió este material, es porque además de ser un material natural con buenas propiedades aislantes, se lo puede adquirir por un costo relativamente bajo.



Figura 3. 4 Aglomerado de resina con cascarilla de arroz

Fuente: Autor

Para el aislamiento requerido se va a utilizar un aglomerado de cascarilla de arroz y resina polivinílica, ésta resina ayudó a la mejor unión de cada una de las fibras de cascarilla en comparación con otras resinas y pegas utilizadas.

3.7.1. Composición del aglomerado

Las cantidades utilizadas para el aglomerado se detallan a continuación:

1 gramo de cascarilla de arroz

1 gramo de resina de polivinilo



Figura 3. 5 Aglomerado de resina con cascarilla de arroz

Fuente: Autor

Con estas cantidades de material se obtuvo una mezcla homogénea como se muestra en la figura 3.5, aglomerado con 50 % de resina de polivinilo y 50 % de cascarilla de arroz.

3.7.2. Cálculo de la conductividad térmica de la cascarilla de arroz

Para el cálculo de la conductividad térmica del material aislante se utilizó el procedimiento de la norma ASTM C-177 del anexo M, que indica cómo se determina la conductividad térmica de un material mediante un ensayo llamado de placa caliente.

En este ensayo se construye un prototipo donde genera calor mediante una placa caliente en una cara del material y la otra se mantiene a temperatura normal se toma las medidas en un lapso de cinco minutos y se procede a calcular su conductividad.

3.7.2.1. Equipos y materiales utilizados para el ensayo.

3.7.2.1.1. Prototipo de placa caliente

Para el ensayo se construyó un prototipo según la norma ASTM C-177 como se muestra en la figura 3.6.

La norma indica que para obtener una mayor exactitud en los datos obtenidos este ensayo se lo realiza en un medio totalmente aislado y controlado, la norma sugiere utilizar materiales químicamente estables para las guardas de protección, es por esta

razón que se utilizó una caja de madera ya que este material es un buen aislante y evita las pérdidas de temperatura hacia el ambiente.

Las dimensiones del equipo se tomaron en base a los datos de Tabla 3.6.

Tabla 3. 6 Dimensiones para prototipo de placa caliente

Espesor máximo de la probeta (cm)	Dimensiones de la probeta (cm)
2,5	10
5	10
6,25	15
10	30

Fuente: Norma Iram 11.599

Debido a que las probetas utilizadas para la prueba de conductividad térmica tienen un espesor de 4 y de 5 cm se construyó el prototipo de 10 cm de ancho por 10 cm de largo como se puede apreciar en el anexo E.

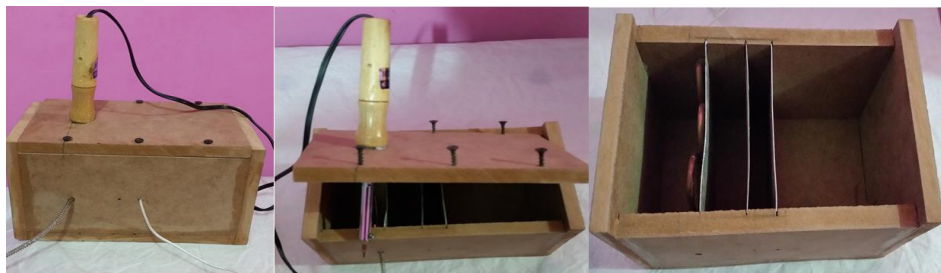


Figura 3. 6 Prototipo para ensayos de conductividad

Fuente: Autor

3.7.2.1.2. Multímetro

Este equipo nos ayudará con la toma de datos tanto de temperaturas de la placa caliente y fría como de corriente y voltaje de la fuente de calor.



Figura 3. 7 Multímetro para toma de datos

Fuente: Autor

3.7.2.1.3. Termocupla tipo K

Este elemento nos sirve para registrar las temperaturas tanto de la placa caliente y de la fría, este tipo de medidores de temperatura son los más utilizados debido a que soportan un amplio rango de temperaturas.



Figura 3. 8 Medidor de temperaturas tipo k

Fuente: Autor

3.7.2.1.4. Placas de aluminio

En el anexo M, la norma indica que para las placas tanto caliente como fría se debe utilizar materiales con un coeficiente de transferencia de calor alto, ésta sugiere cobre y aluminio, por esta razón se seleccionaron placas de aluminio, debido a su distribución uniforme y rápida del calor generado.



Figura 3. 9 Placa de aluminio

Fuente: Autor

3.7.2.1.5. Materiales a ensayar

Los materiales a ensayar serán combinaciones de cascarilla de arroz con espuma de poliestireno y cascarilla de arroz aglomerada con resina.



Figura 3. 10 Probeta de cascarilla de arroz con resina de vinil acrílico

Fuente: Autor



Figura 3. 11 Lamina de poliestireno

Fuente: Autor



Figura 3. 12 Cascarilla de arroz sin aglomerantes

Fuente: Autor

3.7.2.2. Descripción del ensayo

Paso 1: Realizar un probeta con las dimensiones del equipo de placa caliente, obteniendo el largo, ancho y el espesor de la misma, datos que serán utilizados posteriormente para el cálculo de la conductividad térmica



Figura 3. 13 Dimensiones de las probetas ensayadas

Fuente: Autor

Paso 2: procedemos a conectar una termocupla en la placa caliente y una en la placa fría para la toma de datos.

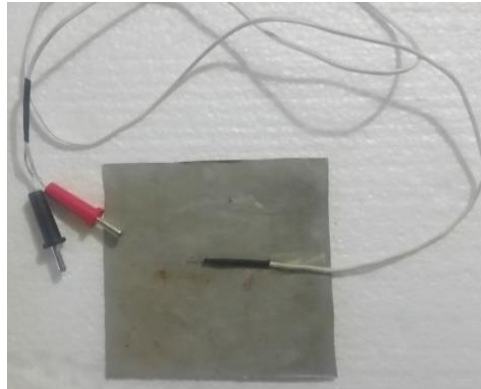


Figura 3. 14 Termocupla en placa de aluminio

Fuente: Autor

Paso 3: Conectar la fuente de calor, en esta práctica se utilizó como fuente de calor un cautín de 20-40 W de potencia este debe calentarse hasta que adquiera una temperatura constante, esto ayudará a evitar errores en el ensayo por variaciones bruscas de temperatura al momento de realizar las mediciones.



Figura 3. 14 Calentamiento de placa caliente

Fuente: Autor

Paso 4: Una vez adquirida una temperatura constante en la fuente de calor procedemos a colocar la probeta a ensayar y sellamos el prototipo para evitar las pérdidas de calor al ambiente.



Figura 3. 15 Prototipo de placa caliente operando

Fuente: Autor

Paso 5: Esperamos 5 minutos después de haber sellado el prototipo y con la ayuda del equipo de medición obtenemos los primeros datos de temperatura, medimos la temperatura tanto de la placa caliente y de la placa fría registramos estos valores y repetimos el proceso en el intervalo de 5 minutos hasta conseguir unas 5 mediciones como mínimo.



Figura 3. 16 Multímetro midiendo temperatura

Fuente: Autor

Paso 6: Una vez obtenidos los datos de las mediciones de la placa caliente y fría se procede a medir los valores de voltaje y corriente que consume la fuente de calor.



Figura 3. 17 Voltaje de la fuente de calor

Fuente: Autor

Paso 7: Una vez obtenidos los valores de la corriente y el voltaje que consume la fuente de calor procedemos a calcular la potencia con la siguiente relación:

$$P = VI \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Dónde:

P: Potencia (W)

V: Voltaje de la red (V)

I: Corriente consumida (A)

Paso 8: Obtenida la potencia de la fuente de calor y con los datos obtenidos del paso 1 se procede a calcular la conductividad térmica con la ayuda de la siguiente relación:

$$K = \frac{e \times P}{\Delta T \times A} \quad (W/m^{\circ}C) \quad \text{Ecuación 3.15}$$

Dónde:

K: conductividad térmica ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)


e: Espesor de la probeta (m)

ΔT : Variación de temperaturas placa caliente menos placa fría ($^\circ\text{C}$)

A: Área de contacto con las placas (m^2)

3.7.3. Resultados del ensayo

Tabla 3. 7 Conductividades de cascarilla de arroz sin aglomerantes

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
Ensayo de conductividad			
Voltaje (V)	119,1		
Corriente (A)	0,25		
Potencia (W)	29,8		
Espesor (m)	0,05		
Área (m²)	0,01		
Material	Cascarilla de arroz		
Tiempo (min)	Temperatura	Temperatura placa fría	Conductividad
5 min	270	25	0,608
10 min	279	25	0,586
15 min	280	28	0,591
20 min	285	29	0,582
25 min	290	31	0,575
30 min	294	32	0,568
35min	297	34	0,566
K Promedio			0,582


Fuente: Autor

Tabla 3. 8: Conductividades de cascarilla de arroz espuma de poliestireno y cascarilla de arroz

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
Ensayo de conductividad			
Voltaje (V)	119,1		
Corriente (A)	0,25		
Potencia (W)	29,8		
Espesor (m)	0,05		
Área (m²)	0,01		
Material	Cascarilla de arroz		
Tiempo (min)	Temperatura		
5 min	280	25	0,584
10 min	286	26	0,573
15 min	293	28	0,562
20 min	295	29	0,560
25 min	297	30	0,558
30 min	299	31	0,556
35min	300	32	0,556
K Promedio			0,564

Fuente: Autor

Tabla 3. 9 Conductividades de cascarilla de arroz aglomerada con resina de vinil acrílico

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
Ensayo de conductividad			
Voltaje (V)	119,1		
Corriente (A)	0,25		
Potencia (W)	29,8		
Espesor (m)	0,04		
Área (m²)	0,01		
Material	Cascarilla de arroz		
Tiempo (min)	Temperatura		
5 min	270	24	0,484
10 min	283	26	0,463
15 min	288	29	0,460
20 min	291	30	0,456
25 min	297	33	0,451
30 min	300	35	0,449
35min	300	37	0,453
K Promedio			0,460

Fuente: Autor

Tabla 3. 10 Conductividades de diferentes aislantes

RESULTADOS DE LOS AISLANTES	
Aislante	Conductividad térmica (W/ m²)
Cascarilla de arroz	0,582
Cascarilla de arroz con espuma de poliestireno	0,564
Cascarilla de arroz aglomerada con resina de vinil	0,460

Fuente: Autor

Una vez realizados los ensayos para determinar la conductividad térmica del aislante se procede a la selección del mismo, como se muestra en la tabla 3.9 el aislante con una menor conductividad térmica es el aglomerado de cascarilla de arroz con resina de vinil acrílico por lo que se selecciona este material como aislante.

3.8. Cálculo del espesor del aislante

$$q = \frac{KA(T_1 - T_2)}{L} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

Dónde:

q: Calor de la estancia (W)

K: Coeficiente de conductividad térmica (W/m°C)

A: Área superficial de transferencia de calor (m²)

T₁: Temperatura lado caliente (°C)

T₂: Temperatura lado frío (°C)

L: Espesor de la pared

$$L = \frac{KA(T_1 - T_2)}{q}$$

$$L = \frac{\left(0,46 \frac{W}{m^{\circ}C}\right) (5,5 m^2)(45 - 16,75)^{\circ}C}{2242,1 W}$$

$$L = 0,032 m$$

$$L = 3,2 cm$$

$$L \cong 3 cm$$

3.9. Instalación de suelo radiante

3.9.1. Instalación de lámina de polietileno



Figura 3. 18 Lámina de polietileno

Fuente: Autor

El tendido de la lámina de polietileno es de gran importancia debido a que ésta ayudará a la impermeabilización del piso, esta lámina actuará como una barrera antihumedad evitando que el material aislante que va sobre ésta se deteriore.



Figura 3. 19 Tendido de lámina de polietileno

Fuente: Autor

3.9.2. Instalación de la banda perimetral



Figura 3. 20 Banda perimetral

Fuente: Autor

La banda perimetral es de espuma de polietileno y cumple la función principal de absorber las dilataciones producidas por el mortero de cemento colocado sobre los tubos emisores, debido a su calentamiento/enfriamiento. Así mismo genera un aislamiento lateral del sistema.



Figura 3. 21 Instalación de banda perimetral

Fuente: Autor

3.9.3. Tendido de lámina aislante



Figura 3. 22 Instalación del aislante

Fuente: Autor

En este proyecto se utilizará cascarilla de arroz aglomerada con resina de vinil acrílico como aislante, la función de la lámina de aislamiento es evitar que el calor generado por los tubos se pierda por el mismo y sea aprovechado en su mayoría para calentar el mortero sobre los tubos del piso radiante.



Figura 3. 23 Piso con aislamiento de aglomerado de cascarilla de arroz

Fuente: Autor

3.9.4. Colocación de malla electro soldada

La malla electro soldada está construida con varilla de 4,5 mm de diámetro con puntos de suelda en cada una de sus uniones, también consta de soportes de 3 cm de altura para mejorar su estabilidad sobre el material de aislamiento.



Figura 3. 24 Malla de acero Electro soldada

Fuente: Autor

Esta malla cumplirá la función de soporte del mortero, evitando que éste tienda a deformarse por la flexibilidad del aislante, y a la vez servirá como base de sujeción para la tubería emisora de calor.



Figura 3. 25 Malla de acero Electro soldada sobre lámina de aislamiento

Fuente: Autor

3.9.5. Tendido de lámina de polietileno sobre malla electro soldada

El tendido de una lámina de polietileno sobre la malla electro soldada servirá como impermeabilizante para la lámina de aislamiento, debido a que esta no permitirá que el mortero aplique presión a la lámina de aislamiento permitiendo que éste quede soportado en la malla electro soldada.



Figura 3. 26 Lámina de polietileno y malla electro soldada

Fuente: Autor

Al mismo tiempo que la lámina de polietileno impide el paso del mortero hacia la lámina de cascarilla de arroz ayudará como doble aislamiento de calor obligando a que el calor generado por la tubería se transmita al exterior.



Figura 3. 27 Lámina de polietileno tendida sobre malla electro soldada

Fuente: Autor

3.9.6. Tendido de la tubería

El tendido de la tubería se realiza acorde al diseño del serpentín, escogido previamente en el diseño, una vez colocada la malla electro soldada se tiende la tubería y se da forma al circuito fijando la tubería con amarras plásticas, debido a que es tubería flexible, caso contrario sería un problema sujetarla para obtener la forma deseada.



Figura 3. 28 Tendido de red de tuberías

Fuente: Autor

A medida que se va siguiendo los pasos del diseño preliminar el serpentín va tomando la forma final, en este caso se tomó un diseño en espiral, debido a que este tipo de diseño es el que distribuye de una forma uniforme el calor generado.



Figura 3. 29 Serpentín en espiral

Fuente: Autor

3.9.7. Instalación de fuente de calor

Una vez finalizada la instalación del serpentín procedemos a instalar las tuberías tanto de entrada y de salida, las cuales estarán unidas a la fuente de calor y al sistema de impulsión respectivamente.



Figura 3. 30 Tubería de entrada, salida y calefacción de agua

Fuente: Autor

La instalación de la fuente se realiza en un lugar que no interfiera con el desarrollo normal de las actividades del local, ésta debe ser de preferencia lo más cercano al circuito de tuberías para evitar pérdidas de calor en el transporte del líquido hasta la red de tuberías.

En la instalación de las tuberías se colocó termocuplas tanto a la entrada y a la salida del serpentín esto ayudará a la verificación y control de las temperaturas de trabajo del sistema de suelo radiante evitando que la temperatura de entrada sea muy baja o a la vez demasiado alta.



Figura 3. 31 Medidores de temperatura entrada y salida de serpentín

Fuente: Autor

3.9.8. Instalación del grupo de impulsión

Una vez terminadas las conexiones de la fuente de calor con el serpentín se procede a la instalación del grupo de impulsión el mismo que contará con la bomba, el tanque de almacenamiento y la estructura para soportar a los mismos.



Figura 3. 32 Estructura Metálica

Fuente: Autor



Figura 3. 33 Bomba de agua

Fuente: Autor



Figura 3. 34 Tanque de almacenamiento

Fuente: Autor



Figura 3. 35 Tubería de succión

Fuente: Autor



Figura 3. 36 Tubería de descarga de la bomba

Fuente: Autor



Figura 3. 37 Tubería de descarga a tanque de almacenamiento

Fuente: Autor



Figura 3. 38 Sistema de impulsión y calentamiento completo

Fuente: Autor

3.9.9. Regulación de temperatura y caudal

Una vez instalada la fuente de calor y la red de tuberías se procede a la regulación de la temperatura y del flujo de agua que va a circular por las tuberías, esta regulación se la realiza desde la fuente de calor y con ayuda de válvulas de paso, la altura del tanque del almacenamiento se encuentra a 1,60 m medida desde el piso, se eligió esta altura debido a que la pared cuenta con una entrada de aire la cual servirá como superficie base para la estructura que soportará el tanque de almacenamiento.

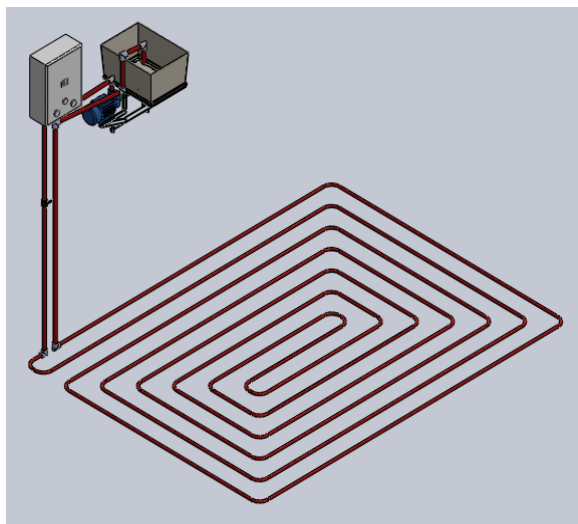


Figura 3. 39 Circuito con fuente de calor

Fuente: Autor

3.9.10. Pruebas de verificación

Una vez realizadas todas las conexiones de la red de tuberías a la fuente de calor y colocados todos los elementos se procede a realizar una prueba de verificación para comprobar que no existan fugas de agua, esta verificación es de vital importancia puesto que una vez colocado el mortero no se podrá realizar ningún tipo de reparación.

3.9.11. Tendido del mortero

Realizadas todas las pruebas de verificación se procede a colocar el mortero este debe estar en un estado que no contenga mucho líquido para su rápido secado, el

espesor del mortero debe estar previamente elegido en el diseño, y recordando que este debe ser mayor a 45 mm.



Figura 3. 40 Mortero

Fuente: Autor



Figura 3. 41 Tendido y nivelado del mortero

Fuente: Autor



Figura 3. 42 Piso completamente terminado

Fuente: Autor

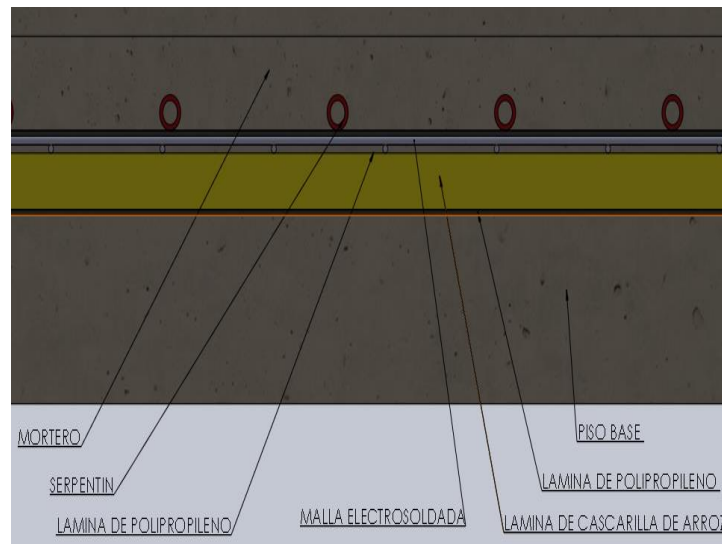


Figura 3. 43 Suelo radiante instalado

Fuente: Autor

3.9.12. Pruebas de funcionamiento

Una vez que el mortero esté seco se da inicio al sistema de calefacción midiendo las temperaturas del piso conforme avanza el tiempo.

3.10. Resultados

3.10.1. Temperaturas de calefacción en suelo radiante

Tabla 3. 11 Temperaturas de piso radiante

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	24
15	25
30	26
45	26
60	29
75	30
90	31
105	32
120	32
135	33
150	34
165	34
180	34
195	35
210	35
225	35
240	35

Realizado por: Autor

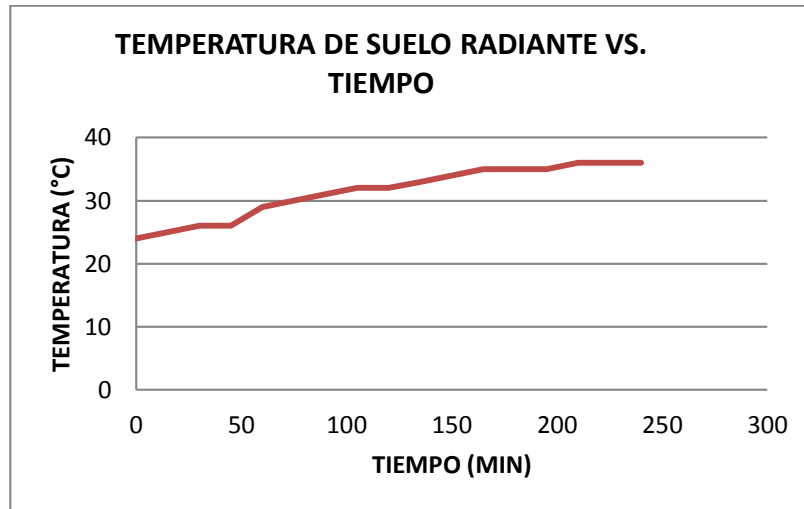


Figura 3. 44 Temperatura vs tiempo de calentamiento

Fuente: Autor

3.10.2. Pruebas de enfriamiento de suelo radiante vs tiempo

Tabla 3. 12 Temperaturas de piso radiante

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	35
15	35
30	35
45	35
60	34
75	34
90	33
105	32
120	32
135	30
150	29
165	29
180	29
195	28
210	27
225	27
240	26

Realizado por: Autor

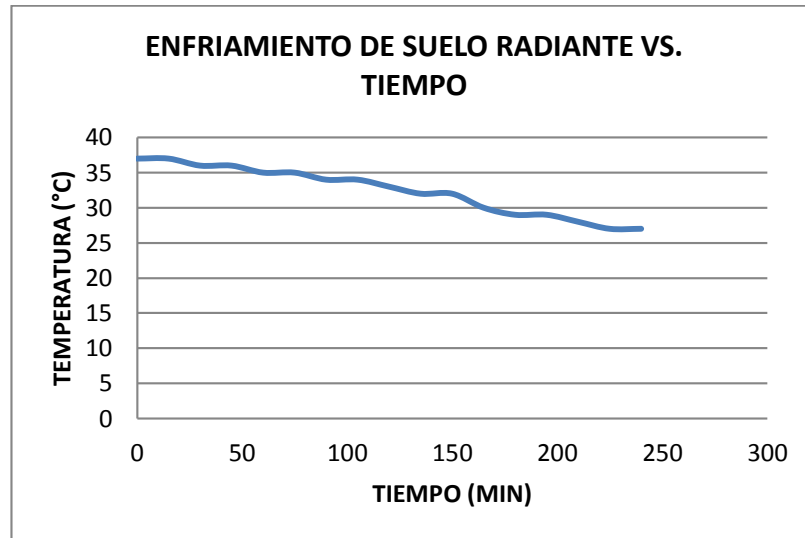


Figura 3. 45 Temperatura vs tiempo de enfriamiento

Fuente: Autor

3.11. Salto térmico

Tabla 3. 13 Salto térmico

T. entrada (°C)	T. salida (°C)	Salto térmico (°C)
45	42	3
46	42	4
47	45	2
49	46	3
49	48	1
50	48	2
51	48	3
53	50	3
55	53	2
55	53	2
55	53	2
Promedio		2,5

Realizado por: Autor

3.12. Cálculo de la eficiencia del sistema

Para calcular la eficiencia del sistema se utilizó la siguiente relación:

$$\eta = \frac{q_s}{q_e}$$

Dónde:

η : Eficiencia del sistema

q_s : Calor de salida en el piso radiante

q_e : Calor que entrega la tubería al piso radiante

Para calcular la eficiencia del sistema se tomaron los datos de temperatura en la fuente de calor, a la entrada y a la salida del serpentín como se muestra en la Tabla 3.13, y los datos mencionados en el literal 3.4.

Tabla 3. 14 Temperaturas del sistema

Temperaturas del sistema	
T. promedio en el calefón	53,6 °C
T. promedio en la entrada de serpentín	50,5 °C
T. promedio a la salida del serpentín	48 °C

Realizado por: Autor

3.12.1. Cálculo del calor de entrada

La entrada de calor es aquella que se da entre el calefón y el serpentín, para lo cual se utiliza la siguiente relación.

$$q_e = mCp\Delta T$$

$$q_e = \left(0,054 \frac{Kg}{s}\right) \left(4,18 \frac{Kj}{Kg \text{ } ^\circ C}\right) (53,6 - 50,5)^\circ C$$

$$q_e = 705,4 \text{ W}$$

3.12.2. Cálculo del calor de salida

Este calor de salida es aquel que el serpentín conduce hacia el mortero, por lo que se calculó con las temperaturas a la entrada y a la salida del serpentín.

$$q_s = mCp\Delta T$$

$$q_s = \left(0,054 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right) \left(4,18 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}\right) (50,5 - 48)^\circ\text{C}$$

$$q_s = 564,3 \text{ W}$$

Por lo tanto la eficiencia del sistema es:

$$\eta = \frac{q_s}{q_e}$$

$$\eta = \frac{564,3}{705,4}$$

$$\eta = 0,799$$

$$\eta \cong 0,8$$

Mediante los cálculos realizados se determinó que el sistema opera con una eficiencia del 80 % valor que se traduce como un buen funcionamiento del sistema de suelo radiante.

3.13. Presupuesto

Es importante realizar un análisis de costos, debido a que se necesita un valor exacto para realizar el presupuesto para aplicaciones posteriores del proyecto.

3.13.1. Costos de equipos y materiales

3.13.1.1. Costos de equipos

Tabla 3. 15 Costos de equipos

N°	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	SUBTOTAL (USD)
1	Calefón	1	200	200
2	Bomba	1	35	35
3	Termocuplas	3	5	15
4	Multímetro	1	20	20
1	Cautín	1	2,25	2,25
			TOTAL	272,25

Realizado por: Autor

3.13.1.2. Costos de materiales

Tabla 3. 16 Costos de materiales

N°	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	SUBTOTAL (USD)
1	Varilla	21	6 m	0,7	14,7
2	Angulo de acero	1	6 m	6	6
3	Tubo de pvc	1	6m	9	9
4	Manguera de polietileno	40	M	1,5	60
5	Amarras plásticas	1	Funda	2	2
6	Abrazaderas	3	---	0,25	0,75
7	Codos	7	---	1,5	10,5
8	Teflón	5	---	0,5	2,5
9	Tanque de agua	1	---	8	8
10	Lámina de plástico	6	M	1,07	6,42
11	Cascarilla de arroz	100	Kg	0,015	1,5
12	Resina	5	4 L	8	40
13	Cemento	2	Oca	7	14
14	Maquinado	1	---	15	15
15	Electrodos	1	Libra	2,5	2,5
				TOTAL	192,87

Realizado por: Autor

3.13.2. Costos varios

Tabla 3. 17 Costos varios

N°	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	SUBTOTAL (USD)
1	Transporte	30	Viajes	2	60
2	Copias	400		0,05	20
3	Impresiones	300		0,1	30
4	Internet	10	H	0,8	8
5	Anillados	3		3	9
				TOTAL	127

Realizado por: Autor

3.13.3. Costo total

Tabla 3. 18 Costo total

DETALLE	COSTO (USD)
Costos de equipos	272,25
Costos de materiales	192,87
Costos varios	127
Subtotal	592,12
10% Imprevistos	59,21
TOTAL	651,33

Realizado por: Autor

El costo del proyecto fue de un total de 651,33 USD, valor que fue auspiciado por el autor del proyecto.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Los parámetros de funcionamiento del suelo radiante fueron determinados en base a la bibliografía existente del tema de investigación, y llegando a determinar las temperaturas de funcionamiento el salto térmico y el dimensionamiento del circuito de calefacción.
- Se obtuvo los factores termodinámicos necesarios para el sistema de suelo radiante, eligiendo como material aislante un aglomerado de cascarilla de arroz con resina de polivinilo con una conductividad térmica de $0,46 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, material ecológico y que se puede buscar varias aplicaciones.
- La tubería seleccionada y recomendada por los fabricantes de suelo radiante es una tubería de polietileno, material que cuenta con las características necesarias para la calefacción de suelo radiante siendo un material que soporta temperaturas hasta de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ y no generará problemas debido a que la temperatura con la que se va a trabajar es de 45°C .
- El sistema de suelo radiante implementado para la calefacción porcina cuenta con los requerimientos necesarios para la subsistencia y el confort térmico de los organismos de estudio, puesto que las temperaturas obtenidas en la práctica están en un rango de $32\text{-}35 \text{ }^\circ\text{C}$ temperaturas recomendadas en los manuales de crianza.
- El salto térmico obtenido en el sistema difiere con los valores de cálculo del diseño, el salto térmico calculado es de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ y el obtenido es de $2.5 \text{ }^\circ\text{C}$, este salto térmico se da debido a que el circuito no cuenta de mucha longitud, siendo un valor muy importante ya que nos da a conocer que no se necesita de mucha energía para recalentar el agua de circulación generando un ahorro significativo para el funcionamiento.
- El sistema de suelo radiante propuesto satisface todos los cálculos realizados en el diseño, debido a que cuenta con una eficiencia del 80%.

4.2. Recomendaciones

- Al momento de realizar el aglomerado de cascarilla de arroz y resina de polivinilo verificar la cantidad de cascarilla en base a las dimensiones del lugar a implementar, puesto que al momento de realizar el aglomerado en grandes cantidades la resina consumida es alta y el costo del aislante aumenta.
- Para la selección de la tubería buscar varias opciones que cuenten con las características técnicas y termodinámicas necesarias para el proyecto de manera que se pueda seleccionar la opción que mejor nos convenga en costos.
- Una vez terminado el tendido de la tubería realizar las pruebas de funcionamiento con la finalidad de asegurarse que no existan filtraciones que afecten el sistema de suelo radiante.
- Al momento de realizar la lámina de aislante procurar hacer láminas pequeñas para que el secado de estas sea más rápido y eficiente, puesto a que si se lo realiza una sola capa en el piso el secado es muy lento y genera demoras en el montaje de los demás implementos.
- Antes de poner en marcha el equipo realizar un purgado de impurezas puesto que los residuos del roscado y de la unión de los tubos puede taponar la entrada de agua del calefón de agua.
- Realizar el mantenimiento del sistema verificando que no haya impurezas en el filtro de la tubería de entrada de la bomba, limpiar el calefón retirando el polvo que puede formarse evitando el taponamiento de las cañerías de gas.

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EBA, «Estructuras Bioclimáticas Avanzadas S.L.,» 06 MAYO 2015. [En línea]. Available: <http://ebasl.es/suelo-radiante/>. [Último acceso: 17 Diciembre 2015].
- [2] C. Ecológicas, «Casas Ecológicas,» 11 Septiembre 2011. [En línea]. Available: <http://icasasecológicas.com/calefacción-suelo-radiante/>. [Último acceso: 17 12 2015].
- [3] D. Olivera, «“Diseño energético de un suelo radiante para una sala de 12 m² ubicada a 4 000 msm en Langui-Cuzco”,» Tesis para optar por el Título de Ingeniero Mecánico, 2011.
- [4] E. Rodríguez, «Diseño, Construcción e Instalación de un sistema de calefacción con energía solar,» Tesis para optar por el Título de Ingeniero Mecánico , 2012.
- [5] R. Villaruel, «Calefacción por piso radiante para salón de eventos de centro de ferias parque Saval,» Tesis para optar por el Título de Ingeniero Constructor, 2010.
- [6] H. Fanghanel, «"Sistemas de calefacción por suelo radiante",» Monografía para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista, 2010.
- [7] A. Aguilar, "Diseño de un sistema de climatización para el refugio del Chimborazo", Tesis para optar al Título de Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politecnica del Chimborazo, Riobamba, Ecuador 2012.
- [8] Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes, «Confort y clima», Enero 2015. [En línea]. Available: <http://www.fau.ucv.ve/idec/racionalidad/Páginas/Manualconfort.html>. [Último acceso: 17 Diciembre 2015].
- [9] Interempresas.net, Climatización e Instalaciones, «la calefacción por suelo radiante a baja temperatura,» 28 DICIEMBRE 2015. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Instaladores/Articulos/148955-Standard-Hidráulica-presenta-Biofloor-calefacción-por-suelo-radiante-a-baja-temperatura.html>. [Último acceso: 11 Febrero 2016].

- [10] Soliclíma Energía Solar , «Climatización mediante suelo radiante,» Febrero 2016. [En línea]. Available: <http://www.soliclíma.es/climatización-suelo-radiante>. [Último acceso: 11 Febrero 2016].
- [11] Instalaciones y eficiencia energética, «Confort térmico y ahorro energético,» Febrero 2016.[En línea].Available:<http://instalacionesyeficienciaenergética.com/calefacción-por-suelo-radiante-confort-ahorro-energético/>. [Último acceso: 11 Febrero 2016].
- [12] Sistema de Climatización Radiante, ALB Sistemas S.A., España 2015.
- [13] Ecoinnova Group, «Suelo Radiante principio de funcionamiento», Abril 2007. [En línea]. Available: <http://www.ecoinnova.com/suelo-radiante/funcionamiento-del-suelo-radiante>. [Último acceso: 11 Febrero 2016].
- [14] Manual técnico, Aplicaciones de calefacción y climatización, UPONOR.
- [15] Manual de Tubos y accesorios de cobre, CEDIC, España 2013.
- [16] Manual técnico, Sistema de suelo radiante, BIOFLOOR.
- [17] Y. A. Cengel, A. J. Ghajar, Transferencia de calor y masa, 4ta ed., México D.F.. México, McGrawHill, 2011.
- [18] Manual Técnico, Destete y engorde porcino, PIC.
- [19] Manual Técnico, Suelo radiante, Sistemas BARBIE.
- [20] Manual Técnico, Tubería para energía solar térmica,ACSIS PLANET

ANEXOS

ANEXO A Características técnicas del tubo de polietileno

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.

Características físicas	Valor	Unidad
Densidad	951	Kg/m ³
Grado de reticulación	>75	% peso
Rugosidad	0,007	mm

Características térmicas	Valor	Unidad
Temperatura máxima de servicio	95	°C
Temperatura máxima puntual	110	°C
Comportamiento al calor 120°C; 1h	<2,5	%
Coefficiente de dilatación lineal	1,5 10 ⁻⁴	K ⁻¹
Calor específico a 23°C	2,3	KJ/kg K
Conductividad térmica	0,35 - 0,38	W/m K
Temperatura VICAT	130 - 132	°C

Características mecánicas	Valor	Unidad
a la tracción	>22	N/mm ²
Alargamiento a la rotura	>400	%
Modulo de elasticidad a 20°C	>800	N/mm ²
Resistencia a la presión interna s =4,8 Mpa, 95°C	>1	Horas
Resistencia a la presión interna s =4,7 Mpa, 95°C	>22	Horas
Resistencia a la presión interna s =4,6 Mpa, 95°C	>165	Horas
Resistencia a la presión interna s =4,4 Mpa, 95°C	>1000	Horas
Resistencia a la presión interna s =2,5 Mpa, 110°C	>1	año

CLASE DE APLICACIÓN	temp (°c)	coef. de seguridad	tiempo de servicio (años)	PRESIÓN MÁXIMA DE SERVICIO		
AGUA FRÍA SANITARIA	20	1,25	1	15,9	19,9	24,8
			50	15,2	19,0	23,8
SUMINISTRO DE AGUA CALIENTE A 60°C	60	1,5	49	8,0	9,9	12,4
			1	7,7	9,7	12,4
			0,011	9,1	11,4	14,2
			1	9,1	11,4	14,2
SUMINISTRO DE AGUA CALIENTE A 70°C	70	1,5	49	7,1	8,9	11,1
			1	7,7	9,7	12,1
			0,011	9,1	11,4	14,2
			1	9,1	11,4	14,2

CALEFACCIÓN POR SUELO RADIANTE Y RADIA-DORES A BAJA TEMPERATURA	20	1,25	2,5	15,7	19,7	24,6
	40	1,5	20	10,1	12,6	15,8
	60	1,5	25	8,0	10,0	12,5
	70	1,3	1	8,6	10,8	13,5
	100	1	0,011	8,6	8,3	10,4
CALEFACCIÓN POR RADIA-DORES A ALTA TEMPERATURA	20	1,25	2,5	15,4	19,3	24,1
	60	1,5	20	8,0	10,0	12,5
	80	1,5	25	6,5	8,1	11,7
	90	1,3	1	7,0	8,7	10,9
	100	1	0,011	8,6	8,3	10,4

Fuente: Catalogo de mangueras y cañerías Funcosa






ANEXO B Factores de forma de diferentes configuraciones

TABLA 3.1

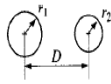
Factores de forma conductivos, resumidos de las Referencias 6 y 7.

Nota: Para objetos inmersos, la diferencia de temperaturas es $\Delta T = T_{\text{objeto}} - T_{\text{campo lejano}}$. La temperatura del campo lejano se toma igual a la temperatura de la superficie isoterma para un medio semi-infinito.

Sistema físico	Esquema	Factor de forma	Restricciones
Cilindro isoterma de radio r inmerso en un medio semi-infinito cuya superficie es isoterma		$\frac{2\pi L}{\cosh^{-1}(D/r)}$ $\frac{2\pi L}{\ln(D/r)}$	$L \gg r$ $L \gg r$ $D > 3r$
Esfera isoterma de radio r inmersa en un medio infinito		$4\pi r$	
Esfera isoterma de radio r inmersa en un medio semi-infinito cuya superficie es isoterma $\Delta T = T_{\text{sup}} - T_{\text{campo lejano}}$		$\frac{4\pi r}{1 - r/2D}$	
Conducción entre dos cilindros isotermos de longitud L inmersos en un medio infinito		$\frac{2\pi L}{\cosh^{-1}\left(\frac{D^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2}\right)}$	$L \gg r$ $L \gg D$
Cubo inmerso en un medio infinito, lado L		$8\pi L$	
Cilindro isoterma de radio r situado en un medio semi-infinito como se muestra		$\frac{2\pi L}{\ln(2L/r)}$	$L \gg 2r$
Paralelepípedo rectangular isoterma inmerso en un medio semi-infinito cuya superficie es isoterma		$1.685L \left[\log\left(1 + \frac{b\sqrt{c}}{a}\right) \right]^{-0.59} \left(\frac{b}{c}\right)^{-0.078}$	Véase Referencia 7
Pared plana		$\frac{A}{L}$	Flujo de calor unidimensional

Cilindro hueco, longitud L		$\frac{2\pi L}{\ln(r_e/r_i)}$	$L \gg r$
Esfera hueca		$\frac{4\pi r_i r_e}{r_e - r_i}$	
Disco delgado horizontal inmerso en un medio semi-infinito cuya superficie es isoterma		$\frac{4r}{\pi/2 - \tan^{-1}(r/2D)}$	$D = 0$ $D \gg 2$ $D/2r > 1$ $\tan^{-1}(r/2D)$ en radianes
Semiesfera inmersa en un medio semi-infinito $\Delta T = T_{\text{esfera}} - T_{\text{campo lejano}}$		$2\pi r$	
Esfera isoterma inmersa en un medio semi-infinito cuya superficie está aislada		$\frac{4\pi r}{1 + r/2D}$	

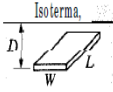
Dos esferas isoterma5 inmersas en un medio infinito



$$\frac{4\pi r_2}{r_1 \left[1 - \frac{(r_1/D)^4}{1 - (r_2/D)^2} \right] - \frac{2r_2}{D}}$$

$D > 5r_{\text{máx}}$

Placa rectangular delgada de longitud L , inmersa en un medio semi-infinito cuya superficie es isoterma



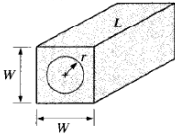


$$\frac{\pi W}{\ln(4W/L)}$$

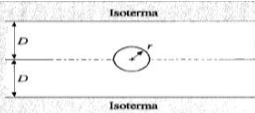
$$\frac{2\pi W}{\ln(4W/L)}$$

$$\frac{2\pi W}{\ln(2\pi D/L)}$$

$D = 0$
 $W > L$
 $D \gg W$
 $W > L$
 $W \gg L$
 $D > 2W$

Sistema físico	Esquema	Factor de forma	Restricciones
Discos paralelos inmersos en un medio infinito		$\frac{4\pi r}{\left[\frac{r_1}{2} + \tan^{-1}(r/D) \right]}$	$D > 5r$ $\tan^{-1}(r/D)$ en radianes
Cilindros excéntricos de longitud L		$\frac{2\pi L}{\cosh^{-1}\left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - D^2}{2r_1 r_2}\right)}$	$L \gg r_1$
Cilindro centrado en un prisma cuadrado de longitud L		$\frac{2\pi L}{\ln(0,54W/r)}$	$L \gg W$

Cilindro horizontal de longitud L centrado en una placa infinita



$$\frac{2\pi L}{\ln(4D/r)}$$

Disco delgado horizontal inmerso en un medio semi-infinito cuya superficie es adiabática $\Delta T = T_{\text{disco}} - T_{\text{campo lejano}}$



$$\frac{4\pi r}{\pi/2 + \tan^{-1}(r/2D)}$$

$D/2r > 1$
 $\tan^{-1}(r/2D)$ en radianes

Fuente: Transferencia de calor J. P Holman

ANEXO C Propiedades de líquidos en los puntos de ebullición y congelación

TABLA A-2							
Propiedades en los puntos de ebullición y de congelación							
Sustancia	Datos para la ebullición a 1 atm		Datos para la congelación		Propiedades del líquido		
	Punto normal de ebullición, °C	Calor latente de vaporización, h_{fg} , kJ/kg	Punto de congelación, °C	Calor latente de fusión, h_{if} , kJ/kg	Temp., °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , kJ/kg · K
Amoniaco	-33.3	1 357	-77.7	322.4	-33.3	682	4.43
					-20	665	4.52
					0	639	4.60
					25	602	4.80
Argón	-185.9	161.6	-189.3	28	-185.6	1 394	1.14
Benceno	80.2	394	5.5	126	20	879	1.72
Salmuera (20% de cloruro de sodio por masa)	103.9	—	-17.4	—	20	1 150	3.11
n-Butano	-0.5	385.2	-138.5	80.3	-0.5	601	2.31
Bióxido de carbono	-78.4*	230.5 (a 0°C)	-56.6	—	0	298	0.59
Etanol	78.2	838.3	-114.2	109	25	783	2.46
Etilico, alcohol	78.6	855	-156	108	20	789	2.84
Etilenglicol	198.1	800.1	-10.8	181.1	20	1 109	2.84
Glicerina	179.9	974	18.9	200.6	20	1 261	2.32
Helio	-268.9	22.8	—	—	-268.9	146.2	22.8
Hidrógeno	-252.8	445.7	-259.2	59.5	-252.8	70.7	10.0
Isobutano	-11.7	367.1	-160	105.7	-11.7	593.8	2.28
Queroseno	204-293	251	-24.9	—	20	820	2.00
Mercurio	356.7	294.7	-38.9	11.4	25	13 560	0.139
Metano	-161.5	510.4	-182.2	58.4	-161.5	423	3.49
					-100	301	5.79
Metanol	64.5	1 100	-97.7	99.2	25	787	2.55
Nitrógeno	-195.8	198.6	-210	25.3	-195.8	809	2.06
					-160	596	2.97
Octano	124.8	306.3	-57.5	180.7	20	703	2.10
Aceite (ligero)					25	910	1.80
Oxígeno	-183	212.7	-218.8	13.7	-183	1 141	1.71
Petróleo	—	230-384	—	—	20	640	2.0
Propano	-42.1	427.8	-187.7	80.0	-42.1	581	2.25
					0	529	2.53
					50	449	3.13
Refrigerante-134a	-26.1	216.8	-96.6	—	-50	1 443	1.23
					-26.1	1 374	1.27
					0	1 295	1.34
					25	1 207	1.43
Agua	100	2 257	0.0	333.7	0	1 000	4.22
					25	997	4.18
					50	988	4.18
					75	975	4.19
					100	958	4.22

Fuente: Transferencia de calor Cengel

ANEXO D Propiedades de materiales de construcción

TABLA A-5

Propiedades de materiales de construcción
(a una temperatura media de 24°C)

Material	Espesor, L mm	Densidad, ρ kg/m ³	Conductividad térmica, k W/m · K
Tableros de construcción			
Tablero de asbesto-cemento	6 mm	1 922	—
Tablero de yeso de revoque	10 mm	800	—
	13 mm	800	—
Madera contrachapada (abeto Douglas)	—	545	0.12
	6 mm	545	—
	10 mm	545	—
	13 mm	545	—
	20 mm	545	—
Tablero y entablado aislados (densidad común)	13 mm	288	—
	20 mm	288	—
Tablero duro (de alta densidad, amasado estándar)	—	1 010	0.14
Tablero aglutinado: Densidad media	—	800	0.14
Contrapiso	16 mm	640	—
Contrapiso de madera	20 mm	—	—
Membrana de construcción			
Filtro permeable al vapor	—	—	—
Sello de vapor (2 capas de fieltro de 0.73 kg/m ² estropajeado)	—	—	—
Materiales para piso			
Alfombra y carpeta fibrosa	—	—	—
Alfombra y carpeta de caucho	—	—	—
Loseta (asfalto, linóleo, vinilo)	—	—	—
Materiales para mampostería			
<i>Unidades de mampostería:</i>			
Ladrillo común		1 922	0.72
Ladrillo para fachada		2 082	1.30
Ladrillo de arcilla refractaria		2 400	1.34
		1 920	0.90
		1 120	0.41
Bloques de concreto (3 núcleos ovales, agregado de arena y grava)	100 mm	—	0.77
	200 mm	—	1.0
	300 mm	—	1.30
<i>Concretos:</i>			
Agregados ligeros (incluyendo esquisto, arcilla o pizarra expandidos; escorias de alto horno expandidas; cenizas de alto horno; piedra pómez y escoria)		1 920	1.1
		1 600	0.79
		1 280	0.54
		960	0.33
		940	0.18
Cemento/cal. mortero v estuco		1 920	1.40
		1 280	0.65
Estuco		1 857	0.72

Fuente: Transferencia de calor Cengel

ANEXO E Ensayo de conductividad térmica

Dimensiones de probeta de cascarilla de arroz



Probeta de cascarilla de arroz



Largo



Ancho



Espesor

Fuente: Autor

Dimensiones de probeta de cascarilla de arroz con espuma poliéstereno y cascarilla de arroz



Probeta de cascarilla de arroz -espuma de poliéstereno- cascarilla de arroz



Largo



Ancho



Espesor

Fuente: Autor

Dimensiones de probeta de cascarilla de arroz aglomerada con resina de vinil acrílico



Probeta de cascarilla de arroz aglomerada con resina de vinil acrílico



Largo



Ancho



Espesor

Fuente: Autor

Datos de la fuente de calor



Voltaje consumido de la red

ANEXO F Propiedades del agua a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (Pa·s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-6}
5	9.81	1000	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}
10	9.81	1000	1.30×10^{-3}	1.30×10^{-6}
15	9.81	1000	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-6}
20	9.79	998	1.02×10^{-3}	1.02×10^{-6}
25	9.78	997	8.91×10^{-4}	8.94×10^{-7}
30	9.77	996	8.00×10^{-4}	8.03×10^{-7}
35	9.75	994	7.18×10^{-4}	7.22×10^{-7}
40	9.73	992	6.51×10^{-4}	6.56×10^{-7}
45	9.71	990	5.94×10^{-4}	6.00×10^{-7}
50	9.69	988	5.41×10^{-4}	5.48×10^{-7}
55	9.67	986	4.98×10^{-4}	5.05×10^{-7}
60	9.65	984	4.60×10^{-4}	4.67×10^{-7}
65	9.62	981	4.31×10^{-4}	4.39×10^{-7}
70	9.59	978	4.02×10^{-4}	4.11×10^{-7}
75	9.56	975	3.73×10^{-4}	3.83×10^{-7}
80	9.53	971	3.50×10^{-4}	3.60×10^{-7}
85	9.50	968	3.30×10^{-4}	3.41×10^{-7}
90	9.47	965	3.11×10^{-4}	3.22×10^{-7}
95	9.44	962	2.92×10^{-4}	3.04×10^{-7}
100	9.40	958	2.82×10^{-4}	2.94×10^{-7}

Fuente: Mecánica de fluidos Robert L. Mott

ANEXO G Valores de diseño de la rugosidad de tuberías

Material	Rugosidad ϵ (m)	Rugosidad ϵ (pie)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	3.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}
Tubo extruido; cobre, latón y acero	1.5×10^{-6}	5.0×10^{-6}
Acero, comercial o soldado	4.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}
Hierro galvanizado	1.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}
Hierro dúctil, recubierto	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Hierro dúctil, no recubierto	2.4×10^{-4}	8.0×10^{-4}
Concreto, bien fabricado	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Acero remachado	1.8×10^{-3}	6.0×10^{-3}

Fuente: Mecánica de fluidos Robert L. Mott

ANEXO H Factores de fricción para diferentes tamaños de tubería

Tamaño nominal de la tubería (pulg)	Factor de fricción f_f	Tamaño nominal de la tubería (pulg)	Factor de fricción f_f
$\frac{1}{2}$	0.027	$3\frac{1}{2}$, 4	0.017
$\frac{3}{4}$	0.025	5	0.016
1	0.023	6	0.015
$1\frac{1}{4}$	0.022	8-10	0.014
$1\frac{1}{2}$	0.021	12-16	0.013
2	0.019	18-24	0.012

Fuente: Mecánica de fluidos Robert L. Mott

ANEXO I Longitudes equivalentes de diferentes accesorios

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo—abierta por completo	340
Válvula de ángulo—abierta por completo	150
Válvula de compuerta—abierta por completo	8
— $3/4$ abierta	35
— $1/2$ abierta	160
— $1/4$ abierta	900
Válvula de verificación—tipo giratorio	100
Válvula de verificación—tipo bola	150
Válvula de mariposa—abierta por completo, 2 a 8 pulg	45
—10 a 14 pulg	35
—16 a 24 pulg	25
Válvula de pie—tipo disco de vástago	420
Válvula de pie—tipo disco de bisagra	75
Codo estándar a 90°	30
Codo a 90° de radio largo	20
Codo roscado a 90°	50
Codo estándar a 45°	16
Codo roscado a 45°	26
Vuelta cerrada en retorno	50
Te estándar—con flujo directo	20
—con flujo en el ramal	60

Fuente: Mecánica de fluidos Robert L. Mott

ANEXO J Preparación del aglomerado



Fuente: Autor

ANEXO K Calefón de agua a gas



Fuente: Autor

ANEXO L Placa de características de la bomba

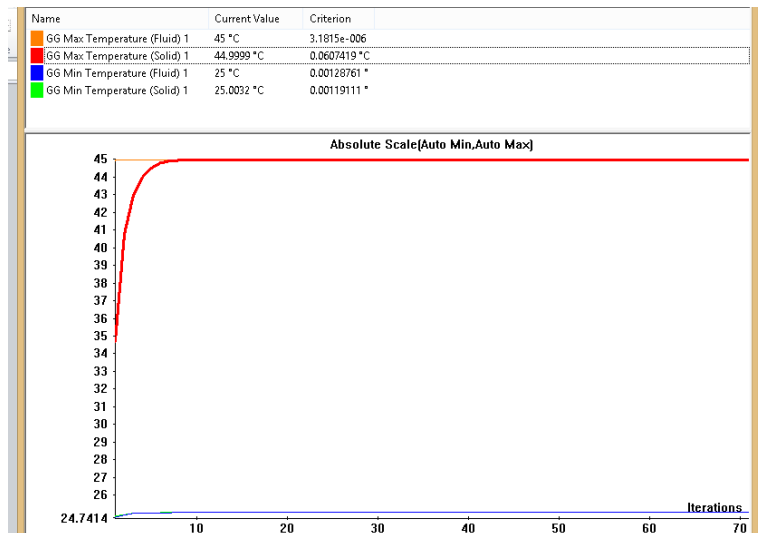
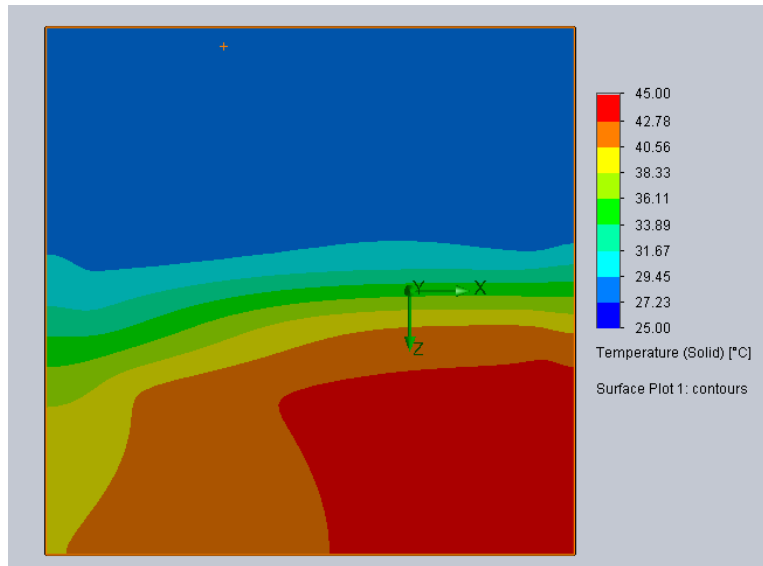
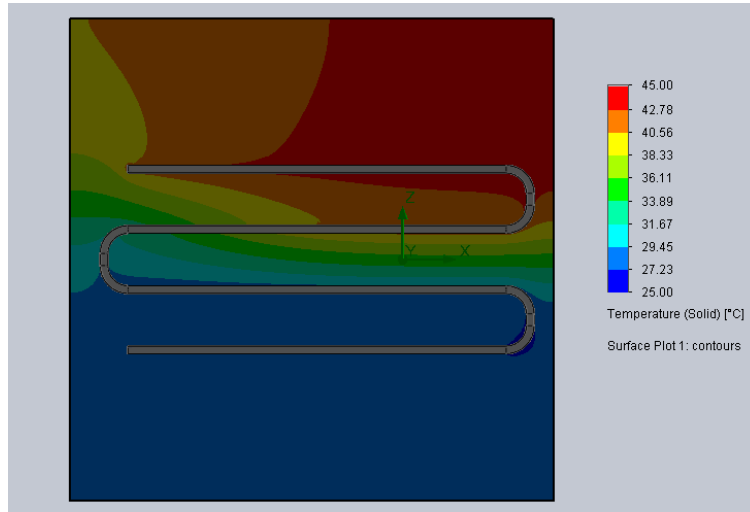
MILANO WATER PUMP	
PUMP QB 60	
Q. 5 ÷ 40 l./min.	n. B
H. max. 40 m.	H. 38 ÷ 5 m
V. 110	Q. max. 40 l./min.
KW. 0.37	Hz. 60
HP. 0.5	3450 min ⁻¹
C. 20 μF.	In. 5.5 A
VL. 300 V	550 W.max
I.CI. B	I.P. 44
CE	thermally protected
continuous duty	844

Fuente: Autor

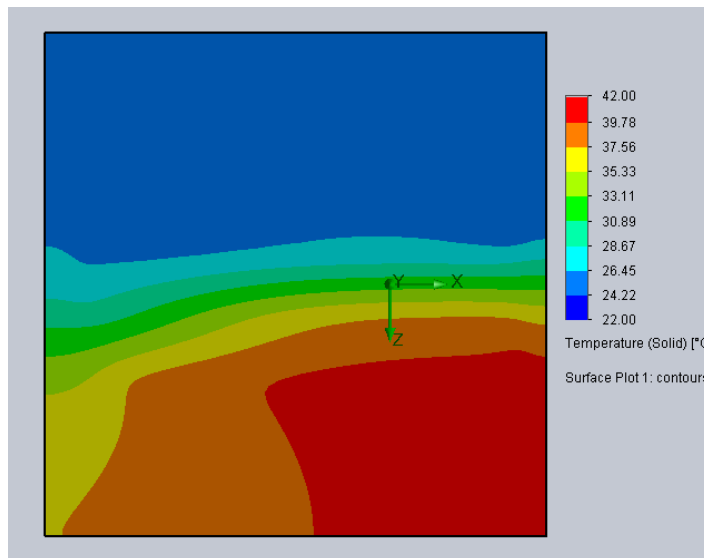
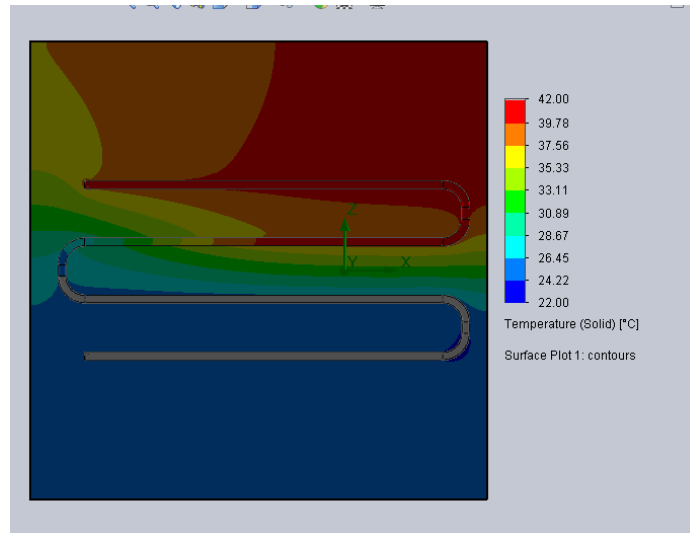
ANEXO M Norma ASTM C-177

ANEXO N Comparación de paso de serpentín

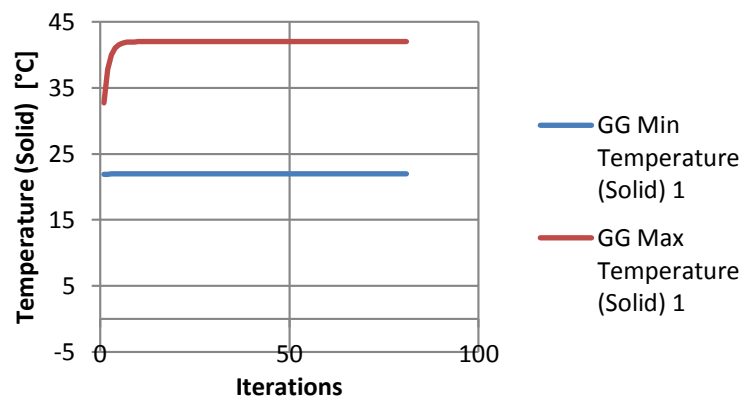
Serpentín con paso de 15 cm



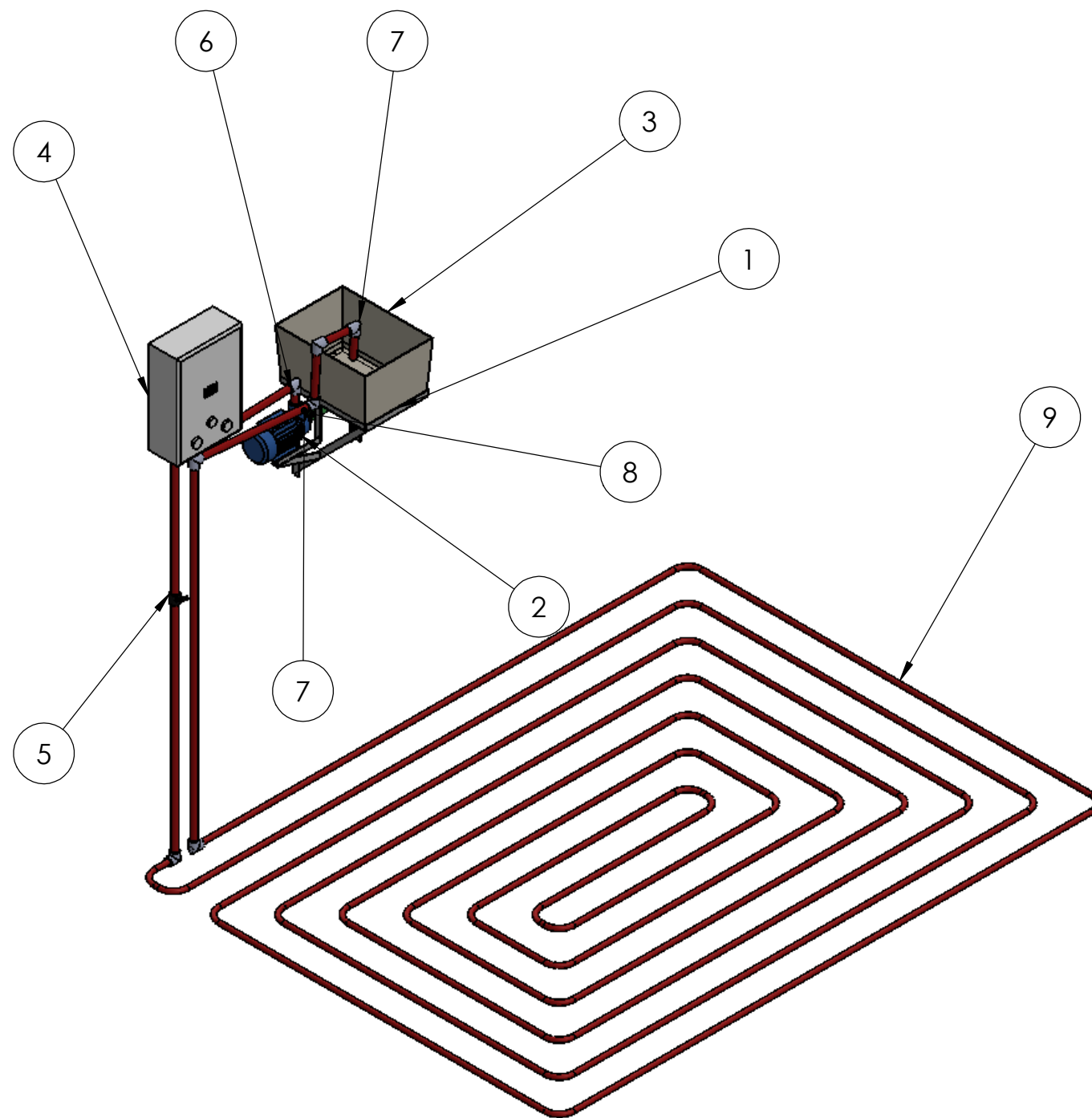
Serpentín con paso de 20 cm



Serpentín [Predeterminado (1) 20 de separación]



PLANOS



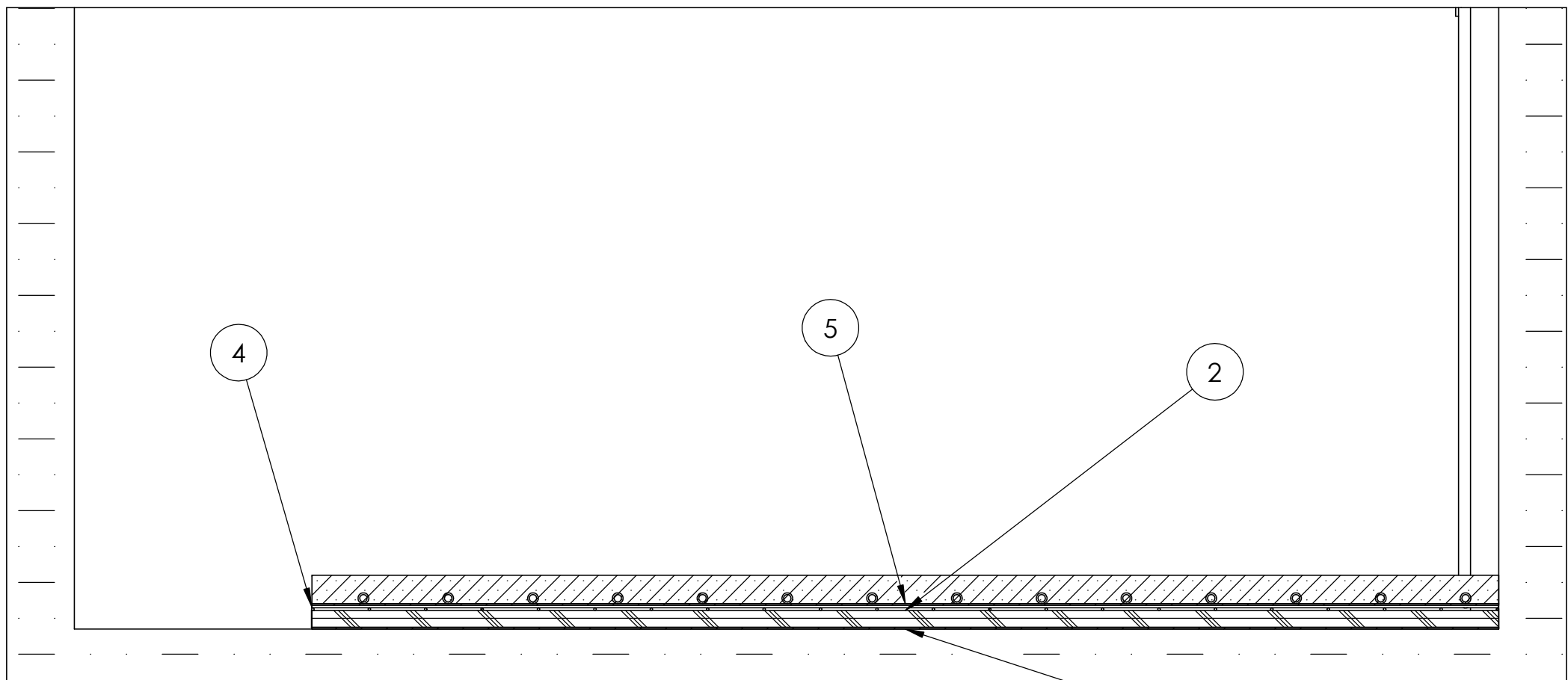
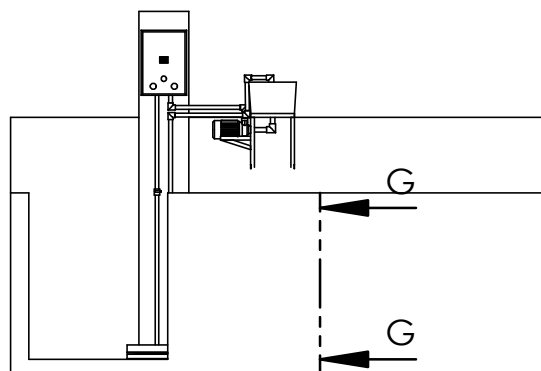
La tubería tanto de succión y de descarga son de pvc para altas temperaturas de 1/2 pulgada de diámetro para la descarga y 1 pulgada en la succión, el serpentín de calentamiento se lo realizó con tubería de polietileno.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	ESTRUCTURA METÁLICA	ÁNGULO DE ACERO	1
2	BOMBA DE AGUA	MILANO DE 1/2 HP	1
3	TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA	TANQUE PLASTICO DE 31.2 LT	1
4	CALEFÓN	CALENTADOR LYM DE 6 LT	1
5	TUBERÍA DE DESCARGA DE CALEFÓN	TUBO DE PVC DE 1/2" PARA AGUA CALIENTE	1
6	TUBERÍA DE SALIDA DE LA BOMBA	TUBO DE PVC DE 1/2" PARA AGUA CALIENTE	1
7	TUBERÍA DE DESCARGA DE SERPENTÍN	TUBO DE PVC DE 1/2" PARA AGUA CALIENTE	1
8	TUBERÍA DE SUCCIÓN	TUBO DE PVC DE 1" PARA AGUA CALIENTE	1
9	SERPENTÍN	MANGUERA FLEXIBLE DE POLIETILENO DE 19 mm DE DIÁMETRO	1

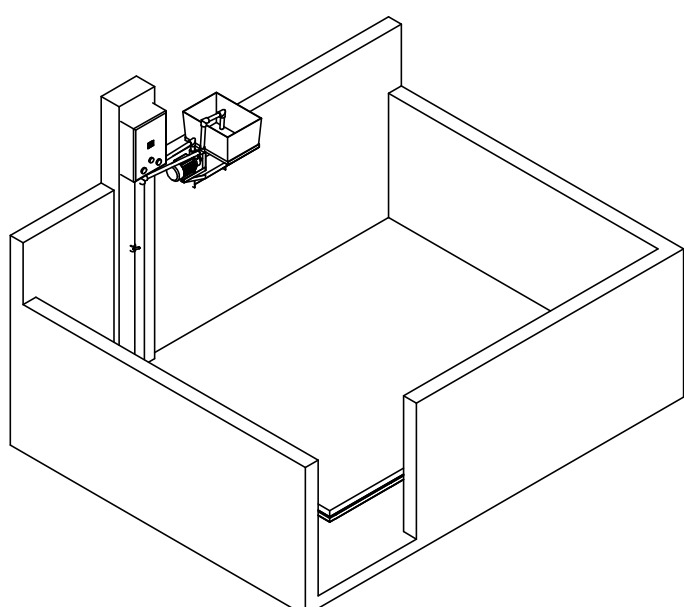
Tolerancia:		Peso:		Material:	
±1		363			
Fecha:		Nombre:		Título:	
2016		GARCIA, D.L.G.		SISTEMA	
Dibujó:		Revisó:		Aprobó:	
2016		2016		2016	
Edición:		Modificación:		Fecha:	
1					
Número de lámina:		Registro:		Escala:	
16		16		1:1	
Sustitución:		Materiales:		A de	

U.T.A.
INGENIERÍA MECÁNICA

S
I
S
T
E
M
A

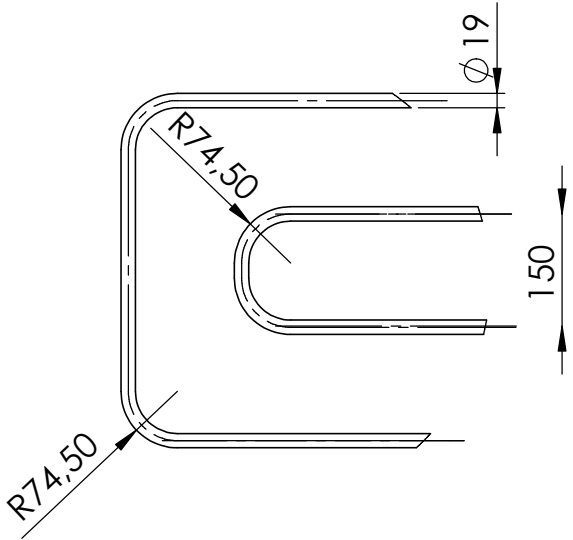
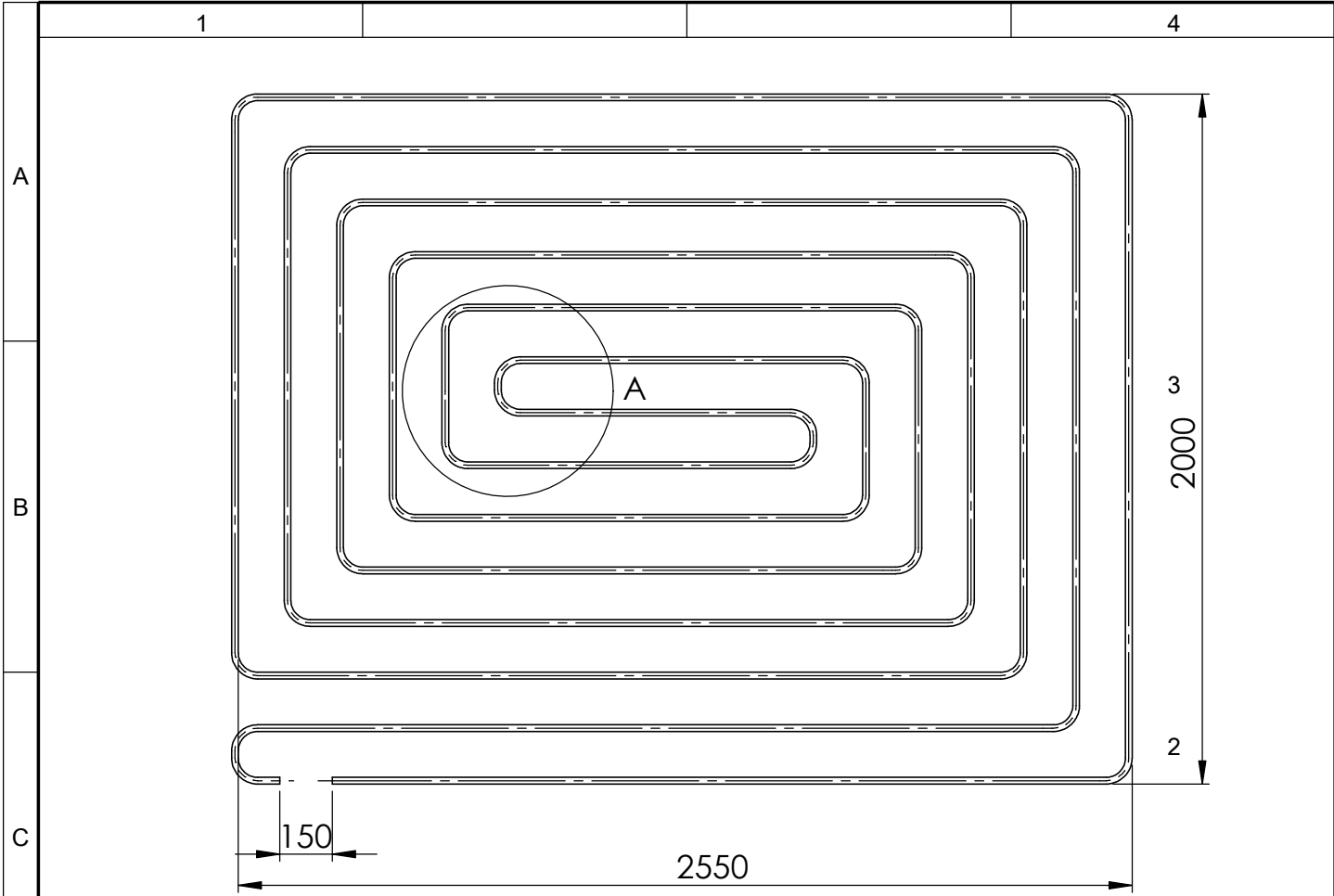


SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 10



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	CORRAL	BLOQUE RECUBIERTO CON MORTERO DE CEMENTO Y ARENA	1
2	LÁMINA DE CASCARA DE ARROZ	CASCARILLA DE ARROZ AGLOMERADA CON RESINA	1
3	LÁMINA DE POLIETILENO PLASTICO	LÁMINA PLASTICA DE POLIETILENO	2
4	MALLA ELECTROSOLDADA	MALLA DE ACERO CON VARILLA DE ACERO DE 4,5 mm DE DIÁMETRO	1
5	MORTERO	MEZCLA DE CEMENTO ARENA Y RIPIO	1

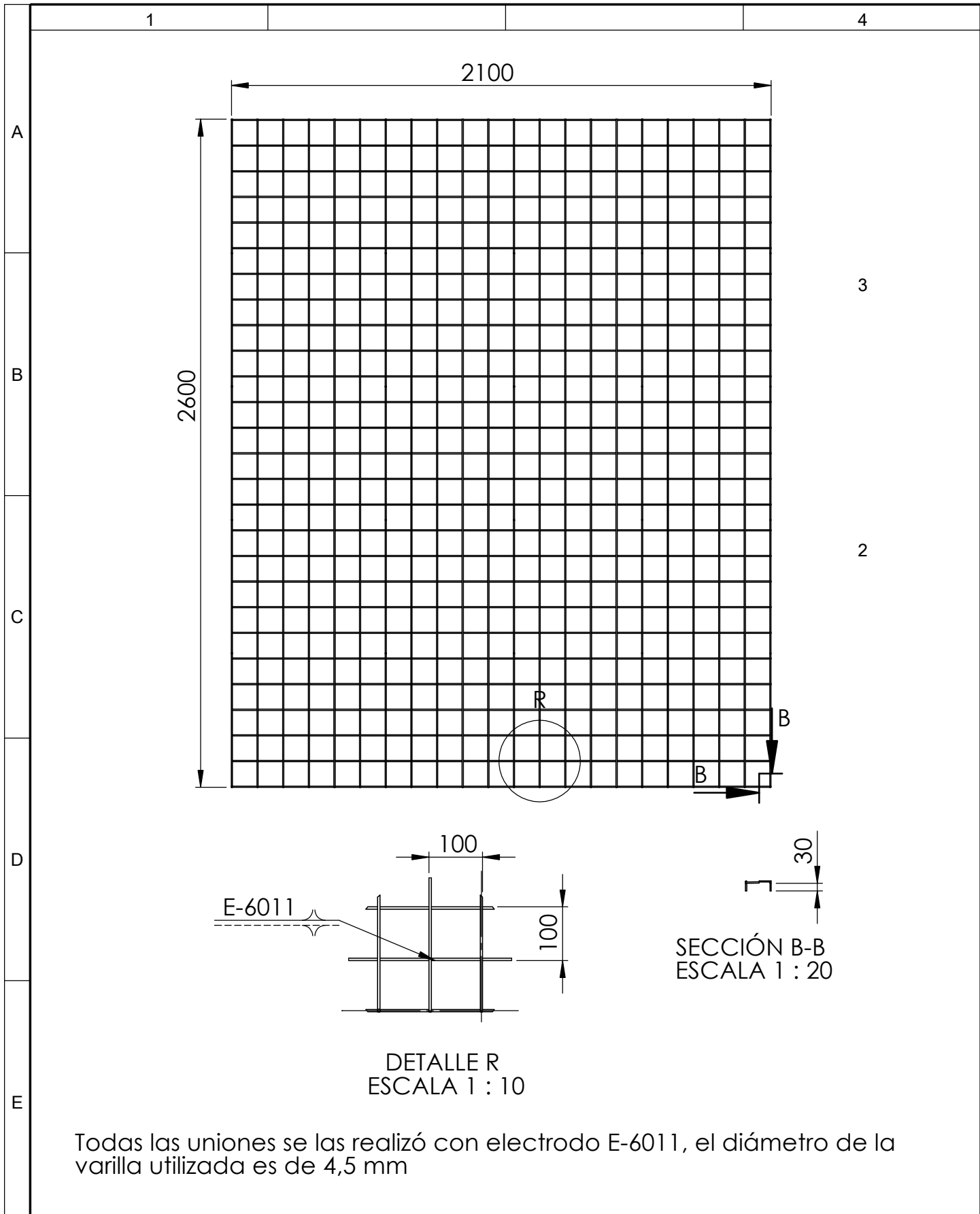
Tolerancia:		Peso:		Material:	
±1		554			
Fecha:		Nombre:		Título:	
20/05/2015		J. D. O.		COM	
Dibujó:		Aprobó:		Número de lámina:	
20/05/2015		20/05/2015		26	
U.T.A. INGENIERÍA MECÁNICA				Registro:	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Sustitución:	



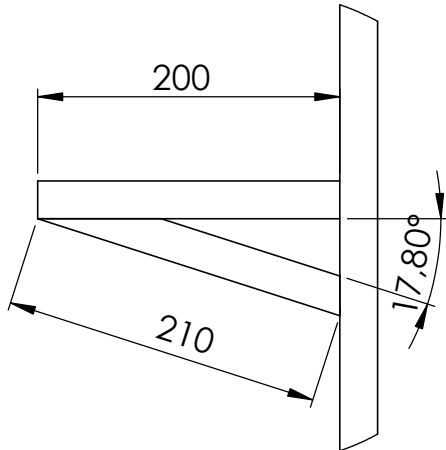
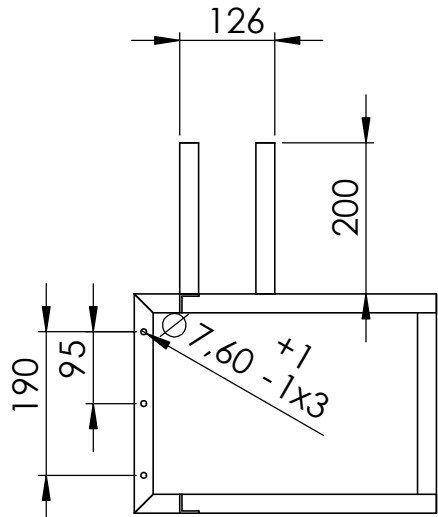
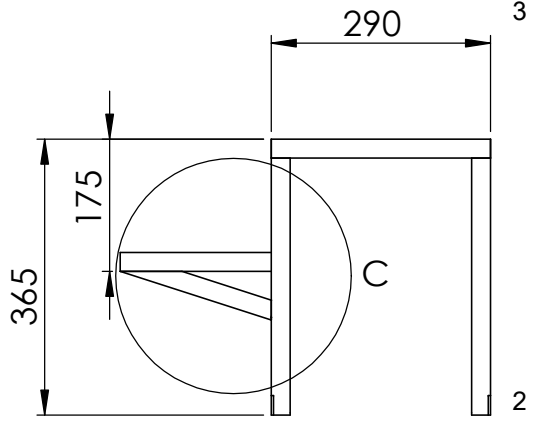
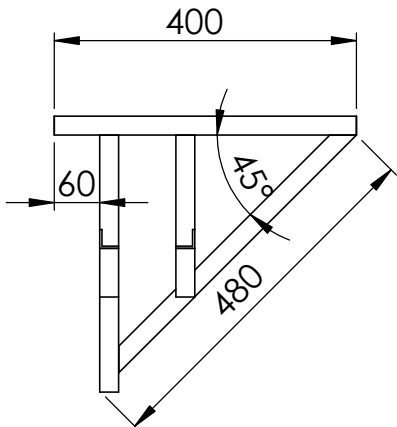
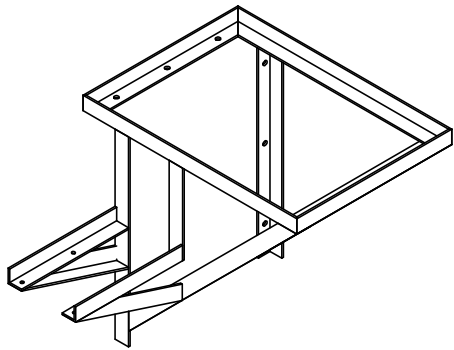
DETALLE A
ESCALA 1 : 10

El material para la tubería del serpentín es de polietileno y todas las unidades se encuentran en mm, aquí se denota el radio en las vueltas de la tubería y la separación de la tubería.

				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				± 1	1 3 6	MANGUERA FLEXIBLE DE POLIETILENO	
				Fecha	Nombre	Título:	Escala:
				Dibujó:	6	SERPENTIN	1
				Revisó:	3		:
				Aprobó:	1		5
				U.T.A. INGENIERÍA MECÁNICA		Número de lámina:	Registro:
						3 d 6	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Sustitución:			



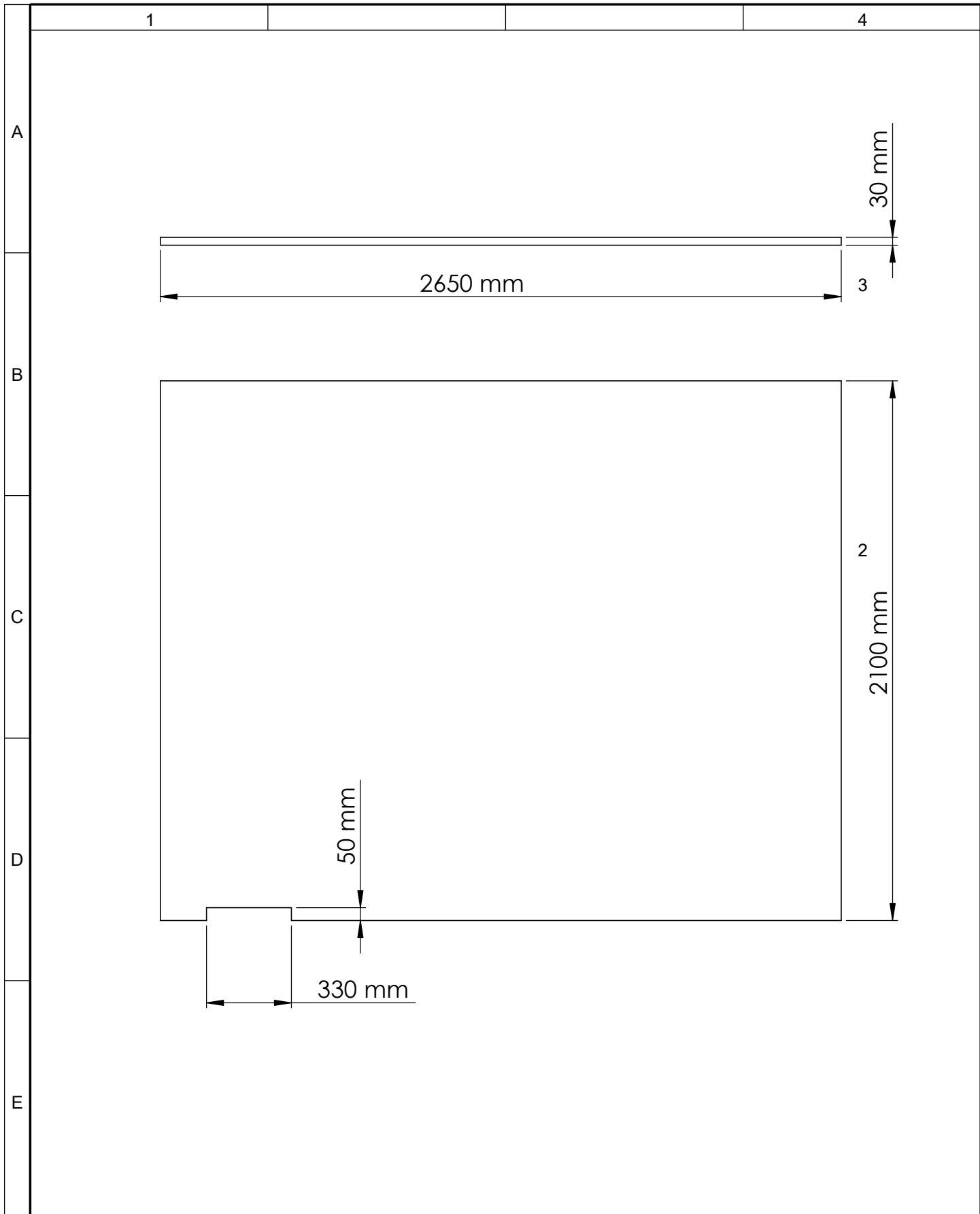
				Tolerancia: ± 1	Peso: 2274	Material: VARILLA DE ACERO	
				Fecha	Nombre	Título: M A L A	Escala: 1 :
				Dibujó: 19/11/2016	Revisó: 19/11/2016	Número de lámina: 4 d	
				U.T.A. INGENIERÍA MECÁNICA		Registro: 	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Sustitución: 8	



DETALLE C
ESCALA 1 : 5

Toda la estructura está realizada con ángulo en L de 1 pulgada, y las uniones soldadas con electrodo E-6011.

				Tolerancia:	Peso:	Material:		
				±1	4	ANGULO DE ACERO		
					5			
					4			
				Fecha	Nombre	Título:		Escala:
				Dibujó: 2	Nombre: D.E.	ESTRUC		1
				Revisó: 1	5			
				Aprobó: 1	g			
				U.T.A. INGENIERÍA MECÁNICA		Número de lámina:	Registro:	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			5 d 6		
						Sustitución:		



				Tolerancia:	Peso:	Material:		
				± 1	4 5 4	CASCARIILLA DE ARROZ CON RESINA		
				Fecha	Nombre	Título:	Escala:	
				Dibujó:	4	L A M I N A	1	
				Revisó:	5		Número de lámina:	5
				Aprobó:	6 d			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	U.T.A. INGENIERÍA MECÁNICA		Sustitución:		



CERTIFICATE

By Authority Of
THE UNITED STATES OF AMERICA
Legally Binding Document

By the Authority Vested By Part 5 of the United States Code § 552(a) and Part 1 of the Code of Regulations § 51 the attached document has been duly INCORPORATED BY REFERENCE and shall be considered legally binding upon all citizens and residents of the United States of America. *HEED THIS NOTICE:* Criminal penalties may apply for noncompliance.



Document Name: ASTM C177: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties

CFR Section(s): by Means of the Guarded Hot-Plate Apparatus
16 CFR 460.5(a)

Standards Body: American Society for Testing and Materials



Official Incorporator:

THE EXECUTIVE DIRECTOR
OFFICE OF THE FEDERAL REGISTER
WASHINGTON, D.C.



Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation C 177; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method establishes the criteria for the laboratory measurement of the steady-state heat flux through flat, homogeneous specimen(s) when their surfaces are in contact with solid, parallel boundaries held at constant temperatures using the guarded-hot-plate apparatus.

1.2 The test apparatus designed for this purpose is known as a guarded-hot-plate apparatus and is a primary (or absolute) method. This test method is comparable, but not identical, to ISO 8302.

1.3 This test method sets forth the general design requirements necessary to construct and operate a satisfactory guarded-hot-plate apparatus. It covers a wide variety of apparatus constructions, test conditions, and operating conditions. Detailed designs conforming to this test method are not given but must be developed within the constraints of the general requirements. Examples of analysis tools, concepts and procedures used in the design, construction, calibration and operation of a guarded-hot-plate apparatus are given in Refs (1-41).²

1.4 This test method encompasses both the single-sided and the double-sided modes of measurement. Both distributed and line source guarded heating plate designs are permitted. The user should consult the standard practices on the single-sided mode of operation, Practice C 1044, and on the line source apparatus, Practice C 1043, for further details on these heater designs.

1.5 The guarded-hot-plate apparatus can be operated with either vertical or horizontal heat flow. The user is cautioned however, since the test results from the two orientations may be different if convective heat flow occurs within the specimens.

1.6 Although no definitive upper limit can be given for the magnitude of specimen conductance that is measurable on a

guarded-hot-plate, for practical reasons the specimen conductance should be less than $16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

1.7 This test method is applicable to the measurement of a wide variety of specimens, ranging from opaque solids to porous or transparent materials, and a wide range of environmental conditions including measurements conducted at extremes of temperature and with various gases and pressures.

1.8 Inhomogeneities normal to the heat flux direction, such as layered structures, can be successfully evaluated using this test method. However, testing specimens with inhomogeneities in the heat flux direction, such as an insulation system with thermal bridges, can yield results that are location specific and shall not be attempted with this type of apparatus. See Test Methods C 976 or C 236 for guidance in testing these systems.

1.9 Calculations of thermal transmission properties based upon measurements using this method shall be performed in conformance with Practice C 1045.

1.10 In order to ensure the level of precision and accuracy expected, persons applying this standard must possess a knowledge of the requirements of thermal measurements and testing practice and of the practical application of heat transfer theory relating to thermal insulation materials and systems. Detailed operating procedures, including design schematics and electrical drawings, should be available for each apparatus to ensure that tests are in accordance with this test method. In addition, automated data collecting and handling systems connected to the apparatus must be verified as to their accuracy. This can be done by calibration and inputting data sets, which have known results associated with them, into computer programs.

1.11 It is not practical for a test method of this type to establish details of design and construction and the procedures to cover all contingencies that might offer difficulties to a person without technical knowledge concerning theory of heat flow, temperature measurements and general testing practices. The user may also find it necessary, when repairing or modifying the apparatus, to become a designer or builder, or both, on whom the demands for fundamental understanding

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C16 on Thermal Insulation and is the direct responsibility of Subcommittee C16.30 on Thermal Measurement.

Current edition approved Nov. 1, 2004. Published November 2004. Originally approved in 1942. Last previous edition approved in 1997 as C 177 – 97.

² The boldface numbers given in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

and careful experimental technique are even greater. Standardization of this test method is not intended to restrict in any way the future development of new or improved apparatus or procedures.

1.12 This test method does not specify all details necessary for the operation of the apparatus. Decisions on sampling, specimen selection, preconditioning, specimen mounting and positioning, the choice of test conditions, and the evaluation of test data shall follow applicable ASTM Test Methods, Guides, Practices or Product Specifications or governmental regulations. If no applicable standard exists, sound engineering judgment that reflects accepted heat transfer principles must be used and documented.

1.13 This test method allows a wide range of apparatus design and design accuracy to be used in order to satisfy the requirements of specific measurement problems. Compliance with this test method requires a statement of the uncertainty of each reported variable in the report. A discussion of the significant error factors involved is included.

1.14 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only. Either SI or Imperial units may be used in the report, unless otherwise specified.

1.15 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* Specific precautionary statements are given in Note 21.

1.16 Major sections within this test method are arranged as follows:

	Section	Section
Scope	1	1
Referenced Documents	2	2
Terminology	3	3
Summary of Test Method	4	4
Significance and Use	5	5
Apparatus	6	6
Specimen Preparation and Conditioning	7	7
Procedure	8	8
Calculation of Results	9	9
Report	10	10
Precision and Bias	11	11
Keywords	12	12
	Figures	
General Arrangement of the Mechanical Components of the Guarded-Hot-Plate Apparatus	Fig. 1	Fig. 1
Illustration of Heat Flow in the Guarded-Hot-Plate Apparatus	Fig. 2	Fig. 2
Example Report Form	Fig. 3	Fig. 3
	Annexes	
Importance of Thickness	A1.1	A1.1
Measuring Thickness	A1.2	A1.2
Limitations Due to Apparatus	A1.3	A1.3
Limitations Due to Temperature	A1.4	A1.4
Limitations Due to Specimen	A1.5	A1.5
Random and Systematic Error Components	A1.6	A1.6
Error Components for Variables	A1.7	A1.7
Thermal Conductance or Thermal Resistance Error Analysis	A1.8	A1.8
Thermal Conductivity or Thermal Resistivity Error Analysis	A1.9	A1.9
Uncertainty Verification	A1.10	A1.10

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

- C 168 Terminology Relating to Thermal Insulation
- C 236 Test Method for Steady-State Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box⁴
- C 518 Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus
- C 687 Practice for Determination of Thermal Resistance of Loose-Fill Building Insulation⁴
- C 976 Test Method for Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Calibrated Hot Box
- C 1043 Practice for Guarded-Hot-Plate Design Using Circular Line-Heat Sources
- C 1044 Practice for Using a Guarded-Hot-Plate Apparatus or Thin-Heater Apparatus in the Single-Sided Mode
- C 1045 Practice for Calculating Thermal Transmission Properties Under Steady-State Conditions
- C 1058 Practice for Selecting Temperatures for Evaluating and Reporting Thermal Properties of Thermal Insulation
- E 230 Specification for Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

2.2 ISO Standard:

- ISO 8302 Thermal Insulation—Determination of Steady-State Areal Thermal Resistance and Related Properties—Guarded-Hot-Plate Apparatus⁵

2.3 ASTM Adjuncts:ASTM

- Table of Theoretical Maximum Thickness of Specimens and Associated Errors⁶
- Descriptions of Three Guarded-Hot-Plate Designs⁶
- Line-Heat-Source Guarded Hot-Plate Apparatus⁷

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 For definitions of terms and symbols used in this test method, refer to Terminology C 168 and the following subsections.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *auxiliary cold surface assembly, n*— the plate that provides an isothermal boundary at the outside surface of the auxiliary insulation.

3.2.2 *auxiliary insulation, n*—insulation placed on the back side of the hot-surface assembly, in place of a second test specimen, when the single sided mode of operation is used. (*Synonym*—backflow specimen.)

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

⁴ Withdrawn.

⁵ Available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 13th Floor, New York, NY 10036.

⁶ Available from ASTM Headquarters, Order Adjunct: ADJCO177.

⁷ Available from ASTM Headquarters, Order Adjunct: ADJCO1043.

3.2.3 *cold surface assembly, n*—the plates that provide an isothermal boundary at the cold surfaces of the test specimen.

3.2.4 *controlled environment, n*—the environment in which an apparatus operates.

3.2.5 *guard, n*—promotes one-dimensional heat flow. Primary guards are planar, additional coplanar guards can be used and secondary or edge guards are axial.

3.2.6 *guarded-hot-plate apparatus, n*—an assembly, consisting of a hot surface assembly and two isothermal cold surface assemblies.

3.2.7 *guarded-hot-plate, n*—the inner (rectangular or circular) plate of the hot surface assembly, that provides the heat input to the metered section of the specimen(s).

3.2.8 *hot surface/assembly, n*—the complete center assembly providing heat to the specimen(s) and guarding for the meter section.

3.2.9 *metered section, n*—the portion of the test specimen (or auxiliary insulation) through which the heat input to the guarded-hot-plate flows under ideal guarding conditions.

3.2.10 *mode, double-sided, n*—operation of the guarded-hot-plate apparatus for testing two specimens, each specimen placed on either side of the hot surface assembly.

3.2.11 *mode, single-sided, n*—operation of the guarded-hot-plate apparatus for testing one specimen, placed on one side of the hot-surface assembly.

3.2.12 *thermal transmission properties, n*—those properties of a material or system that define the ability of a material or system to transfer heat such as thermal resistance, thermal conductance, thermal conductivity and thermal resistivity, as defined by Terminology C 168.

3.3 *Symbols: Symbols*—The symbols used in this test method have the following significance:

- 3.3.1 ρ_m —specimen metered section density, kg/m^3 .
- 3.3.2 ρ_s —specimen density, kg/m^3 .
- 3.3.3 λ —thermal conductivity, $\text{W}/(\text{m K})$.
- 3.3.4 σ —Stefan-Boltzmann constant, $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$.
- 3.3.5 A —metered section area normal to heat flow, m^2 .
- 3.3.6 A_g —area of the gap between the metered section and the primary guard, m^2 .
- 3.3.7 A_m —area of the actual metered section, m^2 .
- 3.3.8 A_s —area of the total specimen, m^2 .
- 3.3.9 C —thermal conductance, $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$.
- 3.3.10 C_i —the specific heat of the i th component of the metered section, $\text{J}/(\text{kg K})$.
- 3.3.11 dT/dt —potential or actual drift rate of the metered section, K/s .
- 3.3.12 λ_g —thermal conductivity of the material in the primary guard region, $\text{W}/(\text{m K})$.
- 3.3.13 L —in-situ specimen thickness, m .
- 3.3.14 m —mass of the specimen in the metered section, kg .
- 3.3.15 m_i —the mass of the i th component, kg .
- 3.3.16 m_s —mass of the specimen, kg .
- 3.3.17 Q —heat flow rate in the metered section, W .
- 3.3.18 q —heat flux (heat flow rate per unit area), Q , through area, A , W/m^2 .
- 3.3.19 Q_{ge} —lateral edge heat flow rate between primary Guard and Controlled Environment, W .
- 3.3.20 Q_{gp} —lateral heat flow rate across the gap, W .

- 3.3.21 Q_{gd} —guard heat flow through Specimen, W .
- 3.3.22 Q_{sc} —edge heat flow between Specimen and Controlled Environment, W .
- 3.3.23 R —thermal resistance, $\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$.
- 3.3.24 ΔT —temperature difference across the specimen, $T_h - T_c$.
- 3.3.25 T_c —cold surface temperature, K .
- 3.3.26 T_h —hot surface temperature, K .
- 3.3.27 T_m —mean temperature, K , $(T_h + T_c)/2$.
- 3.3.27.1 *Discussion*—The Guarded-Hot-Plate Apparatus provides a means for measurement of steady state heat flux through insulation materials, that consists of a guarded heater unit, comprised of a center metering area and concentric separately heated guards, and an opposite, similarly sized cooling plate. Specimens are placed in the space between the heater plate and the cooling plate for testing. The guarded-hot-plate is operated as a single or double sided apparatus. Insulation thermal properties are calculated from measurements of metering area, energy input, temperatures, and thickness. The guarded-hot-plate, which provides an absolute measurement of heat flux, has been shown to be applicable for most insulating materials over a wide range of temperature conditions.

4. Summary of Test Method

4.1 Fig. 1 illustrates the main components of the idealized

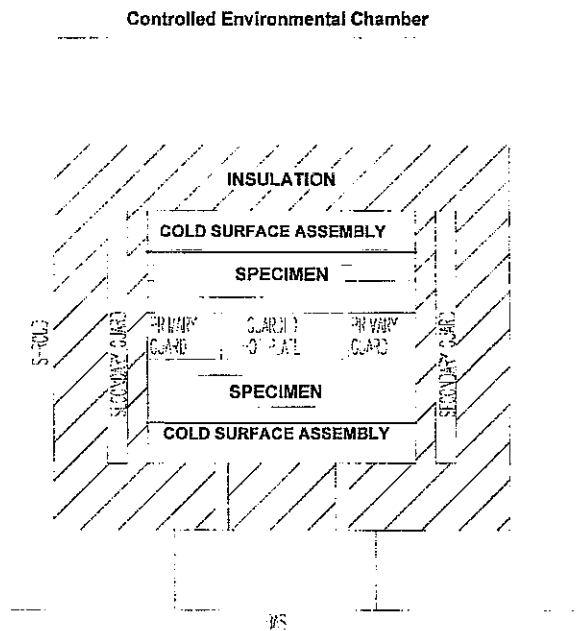


FIG. 1 General Arrangement of the Mechanical Components of the Guarded-Hot-Plate Apparatus

system: two isothermal cold surface assemblies and a guarded-hot-plate. The guarded-hot-plate is composed of a metered section thermally isolated from a concentric primary guard by a definite separation or gap. Some apparatus may have more than one guard. The test specimen is sandwiched between these three units as shown in Fig. 1. In the double-sided mode of

measurement, the specimen is actually composed of two pieces. The measurement in this case produces a result that is the average of the two pieces and therefore it is important that the two pieces be closely identical. For guidance in the use of the one-sided mode of measurement, the user is directed to Practice C 1044. For guidance in the use of a guarded-hot-plate incorporating the use of a line source heater, refer to Practice C 1043.

4.1.1 The guarded-hot-plate provides the power (heat flow per unit time) for the measurement and defines the actual test volume, that is, that portion of the specimen that is actually being measured. The function of the primary guard, and additional coplanar guard where applicable, of the guarded-hot-plate apparatus is to provide the proper thermal conditions within the test volume to reduce lateral heat flow within the apparatus. The proper (idealized) conditions are illustrated in Fig. 1 by the configuration of the isothermal surfaces and lines of constant heat flux within the specimen.

4.1.2 Deviations from the idealized configuration are caused by: specimen inhomogeneities, temperature differences between the metered section and the guard (gap imbalance), and temperature differences between the outer edge of the assembly and the surrounding controlled environment (edge imbalance). These experimental realities lead to heat flow measurements that are too small or too large because the power supplied to the metered section is not exactly equal to that which flows through the specimen in the metered section. The resulting qualitative heat flows are depicted in Fig. 2.

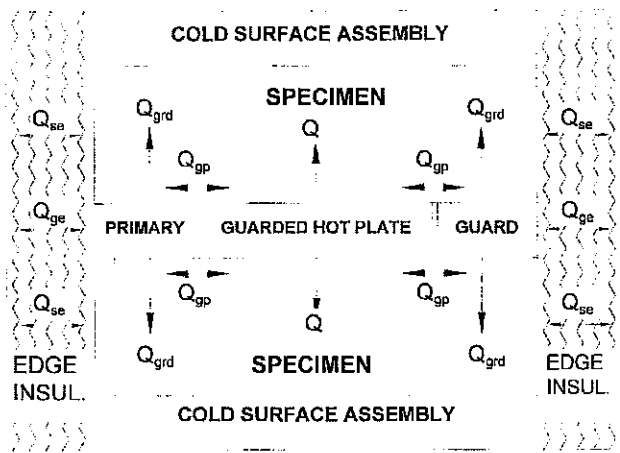


FIG. 2 Illustration of Idealized Heat Flow in a Guarded-Hot-Plate Apparatus

4.2 The three heating/cooling assemblies are designed to create isothermal surfaces on the faces of the specimens within the metered section. The two surfaces designated as the cold surface assemblies are adjusted to the same temperature for the double-sided mode of operation. In practice, because the plates and specimens are of finite dimensions, and because the external controlled environment is often at a temperature different from the edge of the metered section, some lateral heat flow occurs. The primary guard for the guarded hot plate limits the magnitude of the lateral heat flow in the metered

section. The effectiveness of the primary guard is determined, in part, by the ratio of its lateral dimension to that of the metered section and to the specimen thickness (6,7,8,20,31).

4.3 Compliance with this test method requires: the establishment of steady-state conditions, and the measurement of the unidirectional heat flow Q in the metered section, the metered section area A , the temperature gradient across the specimen, in terms of the temperature T_h of the hot surface and the temperature T_c of the cold surface, (or equivalently, the temperature T between the two surfaces), the thickness L_1 and L_2 of each specimen, and guard balance between the metered section and primary guard.

5. Significance and Use

5.1 This test method covers the measurement of heat flux and associated test conditions for flat specimens. The guarded-hot-plate apparatus is generally used to measure steady-state heat flux through materials having a "low" thermal conductivity and commonly denoted as "thermal insulators." Acceptable measurement accuracy requires a specimen geometry with a large ratio of area to thickness.

5.2 Two specimens are selected with their thickness, areas, and densities as identical as possible, and one specimen is placed on each side of the guarded-hot-plate. The faces of the specimens opposite the guarded-hot-plate and primary guard are placed in contact with the surfaces of the cold surface assemblies.

5.3 Steady-state heat transmission through thermal insulators is not easily measured, even at room temperature. This is because heat may be transmitted through a specimen by any or all of three separate modes of heat transfer (radiation, conduction, and convection); any inhomogeneity or anisotropy in the specimen may require special experimental precautions to measure that flow of heat; hours or even days may be required to achieve the thermal steady-state; no guarding system can be constructed to force the metered heat to pass only through the test area of insulation specimen being measured; moisture content within the material may cause transient behaviour; and physical or chemical change in the material with time or environmental condition may permanently alter the specimen.

5.4 Application of this test method on different test insulations requires that the designer make choices in the design selection of materials of construction and measurement and control systems. Thus there may be different designs for the guarded-hot-plate apparatus when used at ambient versus cryogenic or high temperatures. Test thickness, temperature range, temperature difference range, ambient conditions and other system parameters must also be selected during the design phase. Annex A1 is referenced to the user, which addresses such issues as limitations of the apparatus, thickness measurement considerations and measurement uncertainties, all of which must be considered in the design and operation of the apparatus.

5.5 Apparatus constructed and operated in accordance with this test method should be capable of accurate measurements for its design range of application. Since this test method is applicable to a wide range of specimen characteristics, test conditions, and apparatus design, it is impractical to give an all-inclusive statement of precision and bias for the test

method. Analysis of the specific apparatus used is required to specify a precision and bias for the reported results. For this reason, conformance with the test method requires that the user must estimate and report the uncertainty of the results under the reported test conditions.

5.6 Qualification of a new apparatus. When a new or modified design is developed, tests shall be conducted on at least two materials of known thermal stability and having verified or calibrated properties traceable to a national standards laboratory. Tests shall be conducted for at least two sets of temperature conditions that cover the operating range for the apparatus. If the differences between the test results and the national standards laboratory characterization are determined to be significant, then the source of the error shall, if possible, be identified. Only after successful comparison with the certified samples, can the apparatus claim conformance with this test method. It is recommended that checks be continued on a periodic basis to confirm continued conformance of the apparatus.

5.7 The thermal transmission properties of a specimen of material: may vary due to the composition of the material; may be affected by moisture or other environmental conditions; may change with time or temperature exposure; may change with thickness; may change with temperature difference across the specimen; or may change with mean temperature. It must be recognized, therefore, that the selection of a representative value of thermal transmission properties for a material must be based upon a consideration of these factors and an adequate amount of test information.

5.8 Since both heat flux and its uncertainty may be dependent upon environmental and apparatus test conditions, as well as intrinsic characteristics of the specimen, the report for this test method shall include a thorough description of the specimen and of the test conditions.

5.9 The results of comparative test methods such as Test Method C 518 depend on the quality of the heat flux reference standards. The apparatus in this test method is one of the absolute methods used for generation of the reference standards. The accuracy of any comparative method can be no better than that of the referenced procedure. While the precision of a comparative method such as Test Method C 518 may be comparable with that of this test method, Test Method C 518 cannot be more accurate. In cases of dispute, this test method is the recommended procedure.

6. Apparatus

6.1 A general arrangement of the mechanical components of such a guarded-hot-plate apparatus is illustrated in Fig. 1. This consists of a hot surface assembly comprised of a metered section and a primary guard, two cold surface assemblies, and secondary guarding in the form of edge insulation, a temperature-controlled secondary guard(s), and often an environmental chamber. Some of the components illustrated in Fig. 1 are omitted in systems designed for ambient conditions, although a controlled laboratory environment is still required; edge insulation and the secondary guard are typically used only at temperatures that are more than $\pm 10^{\circ}\text{C}$ (20°F) from ambient. At ambient conditions, the environmental chamber is

recommended to help eliminate the effects of air movement within the laboratory and to help ensure that a dry environment is maintained.

6.1.1 The purpose of the hot surface assembly is to produce a steady-state, one-dimensional heat flux through the specimens. The purpose of the edge insulation, secondary guard, and environmental chamber is to restrict heat losses from the outer edge of the primary guard. The cold surface assemblies are isothermal heat sinks for removing the energy generated by the heating units; the cold surface assemblies are adjusted so they are at the same temperature.

6.2 *Design Criteria*—Establish specifications for the following specifications prior to the design. Various parameters influence the design of the apparatus and shall be considered throughout the design process, maximum specimen thickness; range of specimen thermal conductances; range of hot surface and cold surface temperatures; characteristics of the specimens (that is, rigidity, density, hardness); orientation of the apparatus (vertical or horizontal heat flow); and required accuracy.

6.3 *Hot Surface Assembly*—The hot surface assembly consists of a central metered section and a primary guard. The metered section consists of a metered section heater sandwiched between metered section surface plates. The primary guard is comprised of one or more guard heaters sandwiched between primary guard surface plates. The metered section and primary guard shall be thermally isolated from each other by means of a physical space or gap located between the sections. The hot surface assembly using a line-heat-source is covered in Practice C 1043.

NOTE 1—The primary guard, in some cases, is further divided into two concentric sections (double guard) with a gap separator to improve the guard effectiveness.

6.3.1 *Requirements*—The hot surface assembly shall be designed and constructed to satisfy the following minimum requirements during operation.

6.3.1.1 The maximum departure from a plane for any surface plate shall not exceed 0.025 % of the linear dimension of the metered section during operation.

NOTE 2—Planeness of the surface can be checked with a metal straightedge held against the surface and viewed at grazing incidence with a light source behind the straightedge. Departures as small as 2.5 μm are readily visible, and large departures can be measured using shim-stock, thickness gages or thin paper.

6.3.1.2 The average temperature difference between the metered section surface plate and the primary guard surface plate shall not exceed 0.2 K. In addition, the temperature difference across any surface plate in the lateral direction shall be less than 2 % of the temperature difference imposed across the specimen.

NOTE 3—When qualifying the apparatus, additional temperature sensors shall be applied to the surface plates of the metered section and primary guards that verify that the requirements of 6.3.1.2 are satisfied.

6.3.1.3 The surfaces of the metered and primary guard surface plates that are in contact with the test specimen shall be treated to maintain a total hemispherical emittance greater than 0.8 over the entire range of operating conditions.

NOTE 4—At high temperatures the importance of high emittance of the

surfaces adjacent to the specimens cannot be stressed too strongly since radiative heat transfer predominates in many materials as the temperature increases.

6.3.1.4 The metered section and primary guard surface plates shall remain planar during the operation of the apparatus. See 6.3.1.1.

6.3.2 *Materials*—The materials used in the construction of the hot surface assembly shall be carefully chosen after considering the following material property criteria.

6.3.2.1 *Temperature Stability*—Materials are selected for the heaters and surface plates that are dimensionally and chemically stable and suitably strong to withstand warpage and distortion when a clamping force is applied. For modest temperatures, electric resistance heaters embedded in silicone have been successfully employed; at higher temperatures, heating elements sandwiched between mica sheets or inserted into a ceramic core have been used. Surface plates for hot surface assemblies used at modest temperatures have been fabricated from copper and aluminum. High purity nickel alloys have been used for higher temperature applications.

6.3.2.2 *Thermal Conductivity*—To reduce the lateral temperature differences across the metered and primary guard surface plates, fabricate these plates from materials that possess a high thermal conductivity for the temperature and environmental conditions of operation. Copper and aluminum are excellent choices for modest temperature applications; at higher temperatures consider using nickel, high purity alumina or aluminum nitride. These are examples of materials used and the operator must fully understand the thermal conductivity versus temperature dependency of the materials selected.

6.3.2.3 *Emittance*—To obtain a uniform and durable high surface emittance in the desired range, select a surface plate material or suitable surface treatment, or both. For modest temperature applications, high emittance paints may be employed. Aluminum can be anodized to provide the necessary high emittance. For high temperature applications, most ceramics will inherently satisfy this requirement while nickel surface plates can be treated with an oxide coating.

6.3.2.4 *Temperature Uniformity*—Select a heating element design that will supply the necessary heat flux density for the range of specimen thermal conductances to be investigated. The design of the heating element shall also consider the heat flux distribution of the surface of the heating element. Most apparatus incorporate the use of a distributed electric resistance heating element dispersed uniformly across the metered section and the primary guard. The surface plates and heating elements shall be clamped or bolted together in a uniform manner such that the temperature difference requirements specified in 6.3.1.2 are satisfied. Bolting the composite constructions together has been found satisfactory.

6.3.2.5 The insertion of insulating sheets between the heating elements and surface plates (that is, to mount a gap temperature imbalance detector) is allowed. To satisfy the requirements of 6.3.1.2, similar sheets shall be mounted between the heating element and the opposing surface plate.

6.3.2.6 *Hot Surface Assembly Size*—Design criteria established in 6.2 will determine the size of the apparatus. The size of the metered section shall be large enough so that the amount

of specimen material in contact with the metered section (and therefore being measured) can be considered representative of the material being tested.

6.3.2.7 After determining the maximum specimen thickness that will be tested by this design, refer to Adjunct, Table of Theoretical Maximum Thickness of Specimens and Associated Errors, regarding associated errors attributable to combinations of metered section size, primary guard width, and specimen thickness.

NOTE 5—Typically the width of the primary guard equal to approximately one-half of the linear dimension of the metered section has been found to reduce edge heat loss to acceptable levels.

6.3.2.8 *Heat Capacitance*—The heat capacity of the hot surface assembly will impact the time required to achieve thermal equilibrium. Selecting materials with a low specific heat will increase the responsiveness of the apparatus. The thickness of the surface plates needs to be carefully considered; thick plates assist in reducing lateral temperature distributions but reduce responsiveness. A balance between these requirements is needed.

6.4 *The Gap*—The metered section and the primary guard shall be physically separated by a gap. The gap provides a lateral thermal resistance between these sections of the hot surface assembly. The area of the gap in the plane of the surface plates shall not be more than 5 % of the metered section area.

6.4.1 The heater windings from the metered section and primary guard heating elements shall be designed to create a uniform temperature along the gap perimeter.

6.4.2 The metered section area shall be determined by measurements to the center of the gap that surrounds this area, unless detailed calculations or tests are used to define this area more precisely.

6.4.3 Any connections between the metered section and the primary guard shall be designed to minimize heat flow across the gap. If a mechanical means is used to satisfy the requirements of 6.3.1.4, these connections shall be fabricated with materials having a high thermal resistance. Instrumentation or heater leads that cross the gap should be fabricated with fine-gage wire and traverse the gap at an oblique angle.

6.4.4 The gap may be filled with a fibrous insulation. Packing the gap with this insulation has been found to maintain the metered section and primary guard surface plates planar. An additional benefit of this practice for high temperature applications is that the densely packed insulation reduces the amount of heat conducted across the gap spacing.

6.5 *Cold Surface Assembly*—The cold surface assembly consists of a single temperature controlled section and is comprised of a cold surface heater sandwiched between cold surface plates and a heat sink. It is recommended that the size of the cold surface assembly be identical to the hot surface assembly, including the primary guard. Cold surface assemblies may be constructed with a gap where operation of the apparatus is susceptible to edge loss effects. This design is the ideal design, however, this assembly has traditionally been constructed without a gap with great success.

NOTE 6—The temperature of the cold surface assembly may be maintained through the use of a temperature-controlled bath; in this

instance, there is no need to install a cold surface heater. Care must be taken in this instance; the flow rate of the bath must be sufficient to satisfy the temperature uniformity requirements specified in 6.3.1.2 and 6.5.1.

6.5.1 Requirements—The cold surface assemblies shall be designed and constructed to satisfy all of the requirements of 6.3.1 except that, since only one surface plate of each cold surface assembly is in contact with the test specimens, the requirement that specifies the temperature difference between the surface plates shall not apply.

6.5.2 Materials—The criteria to select materials that will be used in the construction of the cold surface assemblies are identical to the hot surface assembly and are listed in 6.3.2.

6.5.3 High Temperature Operation—When the cold surface assemblies will be operated at high temperatures, several thin sheets of insulation may be inserted between the heat sink and cold surface heater. The addition of these insulation sheets will reduce the energy requirements to the cold surface heater and extend service life.

6.6 Additional Edge Loss Protection—Deviation from one-dimensional heat flow in the test specimen is due to non-adiabatic conditions at the edges of the hot surface assembly and the specimens. This deviation is greatly increased when the apparatus is used at temperatures other than ambient. When the guarded-hot-plate apparatus is operated at temperatures that deviate from ambient by more than 10°C (20°F), the apparatus shall be outfitted with additional components to reduce edge losses. These components are described in the following sections and shall be used if edge losses cannot be minimized.

NOTE 7—Another means of assessing whether edge insulation is required is to attach a temperature sensor to the mid-height of the exterior edge of the specimen. Sufficient edge insulation is present if the edge temperature, T_e , satisfies the following requirement.

$$(T_e - T_m)/\Delta T < 0.05 \quad (1)$$

6.6.1 Secondary Guard—To reduce heat exchange between the edges of the guarded-hot-plate and the environment, the guarded-hot-plate shall be outfitted with a co-axial temperature-controlled container referred to as the secondary guard. The secondary guard will be employed to adjust the ambient temperature to approximate the mean temperature of the test specimen.

6.6.1.1 Size—The secondary guard should have an inner dimension that is at least twice the dimension of the hot surface heater and the height should be equal to the thickness of the hot surface heater plus twice the thickness of the thickest specimen that will be tested.

6.6.1.2 Materials—The materials used in the construction of the secondary guard are not as critical as those selected for the hot and cold surface assemblies. However, the materials used in the design of the secondary guard shall be selected so that they are thermally stable over the intended temperature range, the heating element shall be capable of producing the necessary heat flux density to adjust the ambient temperature, and a means of cooling the secondary guard is required if the apparatus is intended for use at temperatures below the laboratory ambient. The use of high thermal conductivity metals is recommended for the construction since the secondary guard should be isothermal.

NOTE 8—Successful secondary guard designs consist of a sheathed heater wire or cable wrapped around an adequately-sized metal tube and pressed against the metal tube with another sheet of metal. For low-temperature operation, a cooling coil has been wrapped around the exterior surface of the secondary guard.

6.6.1.3 Location—The secondary guard shall be positioned around the hot surface assembly such that a uniform spacing is created between the components. The height of the secondary guard shall be adjusted such that the mid-height of the secondary guard is aligned with the center of the hot surface assembly thickness.

6.6.2 Edge Insulation—The interspace between the hot and cold surface assemblies, specimens and the secondary guard shall be filled with an insulating material. Due to the complex shapes of this interspace, a powder or fibrous insulation is recommended.

6.6.2.1 The selection of an edge insulation material will depend on the test conditions. Vermiculite is easy to use but should not be employed at temperatures above 540°C (1000°F) because its thermal conductivity increases dramatically with temperature.

NOTE 9—Avoid the use of vermiculite when the guarded-hot-plate is used to evaluate specimens in different gaseous environments; vermiculite is extremely hygroscopic and the system is difficult to evacuate when it is used.

NOTE 10—Care shall be taken to ensure that there are no voids, pockets, or other extraneous sources of radiative heat transfer occurring at or near the guarded-hot-plate.

6.6.3 Enclosure—The guarded-hot-plate shall be placed inside an enclosure when the apparatus is used in to maintain a gaseous environment that is different than the laboratory ambient.

6.6.3.1 For low-temperature operation, a dry gas environment shall be used to prevent condensation from occurring on the cold surface assemblies and specimens.

6.6.3.2 For high temperature operation, it may be desirable to protect the apparatus from severe degradation by using a non-oxidizing gas.

6.6.3.3 The enclosure can also be used for substituting different gaseous environments and control of the ambient pressure.

6.7 Clamping Force—A means shall be provided for imposing a reproducible constant clamping force on the guarded-hot-plate to promote good thermal contact between the hot and cold surface assemblies and the specimens and to maintain accurate spacing between the hot and cold surface assemblies. It is unlikely that a force greater than 2.5 kPa (50 lb/ft²) will be required for the majority of insulating materials. In the case of compressible materials, a constant pressure arrangement is not needed and spacers between the plates may be necessary to maintain constant thickness.

6.7.1 A steady force, that will thrust the cold surface assemblies toward each other can be imposed by using constant-force springs or an equivalent method.

6.7.2 For compressible specimens, spacers are required if the test thickness can not be measured by other means. The spacers shall be small in cross-section and located near the exterior perimeter of the primary guard. Avoid placing spacers

on surfaces where underlying sensors are being used to measure plate conditions.

NOTE 11—Because of the changes of specimen thickness possible as a result of temperature exposure, or compression by the plates, it is recommended that, when possible, specimen thickness be measured in the apparatus at the existing test temperature and compression conditions. Gaging points, or measuring studs along the outer perimeter of the cold surface assemblies, will serve for these measurements. The effective combined specimen thickness is determined by the average difference in the distance between the gaging points when the specimen is in place in the apparatus and when it is not in place.

6.8 Temperature Measurements:

6.8.1 Imbalance Detectors—A suitable means shall be provided to detect the average temperature imbalance between surface plates of the metering section and the primary guard.

6.8.1.1 Sensors—The gap region shall be instrumented with temperature sensors to monitor and control the average temperature imbalance across the gap. Fine-gage thermocouples connected as thermopiles are often used for this purpose, although other temperature control sensors, such as thermistors, have been used. Highly alloyed thermocouples, rather than pure metals, should be used to maximize the thermal resistance across the gap. Because of nonuniform heat flux within the surface plates, temperature imbalance is not always constant along the gap perimeter. It has been found that with proper design the thermal conductance of the wires crossing the gap can be made relatively small and, therefore, a large number of thermocouples can be used to increase the gap imbalance sensitivity. It is not uncommon to use ten or more sensing elements.

6.8.1.2 Sensitivity—The detection system shall be sufficiently sensitive to ensure that variation in measured properties due to gap temperature imbalance shall be restricted to not more than 0.5 % of the metered section power, as determined experimentally or analytically.

NOTE 12—The sensitivity of many temperature sensors is reduced drastically at temperatures below the laboratory ambient. Particular care must be used in designing thermopile measurement systems to operate under these conditions.

6.8.1.3 Location—When using only a minimum number of sensing elements along the gap, the most representative positions to detect the average balance for a square plate are those at a distance from the corners equal to one-fourth of the side of the metering area. The corners and the axes should be avoided. For a round plate, the sensors should be spaced equally around the gap.

6.8.1.4 Electrically isolated gap imbalance sensors should be placed on both surface plates of the guarded heating unit to average the imbalance on both faces of the heating unit.

6.8.1.5 Thermal junctions or other sensitive elements should each be located in similar areas of the hot surface assembly. It is suggested that all junctions should be located at points directly adjacent to the centers of the areas between heater windings. Any leads crossing the gap should be thermally anchored to the primary guard to provide a heat sink from external thermal variations. In some instances it may be desirable to provide a heat sink for these leads outside the primary guard to minimize any radial heat flow.

6.8.2 Temperature Sensors—Methods possessing adequate accuracy, such as thermistors, thermocouples, diodes and precision resistance thermometers may be used for the measurement of temperatures in the apparatus. Thermocouples are the most widely used detector due to their wide range of applicability and accuracy. The goal is to measure the temperature gradient within the specimen, and the method chosen (sensors mounted on the specimen surface, in grooves, or between interior layers) should be that which yields the highest accuracy in the measurement of the temperature gradient. A discussion of these alternatives is provided in 6.8.2.3 and 6.8.2.4.

6.8.2.1 Use of Thermocouples—Precautions should be used to minimize spurious voltages in temperature control and measuring circuits. Spurious voltages, due to wire inhomogeneities, generally increase as the temperature gradients within the measuring leads increase. For the same reason, junctions between dissimilar metal leads should not be made in the regions of appreciable temperature gradients. Low thermal emf switches should be used in the temperature measurement circuits. An insulated, isothermal box of heavy sheet metal can be used when joining leads of dissimilar metals in the thermocouple circuit. It is recommended that all connections of the thermocouple wire to copper wire be accomplished within the isothermal box in order that the junctions are at the same temperature; then the copper, not the thermocouple, leads are connected to the needed switching devices and/or voltmeters.

6.8.2.2 Accuracy—Thermocouples whose outputs are used to calculate thermal transmission properties shall be fabricated from either calibrated thermocouple wire or wire that has been certified by the supplier, and shall have a standard limit of error equal to or less than the specifications of Tables E 230. The resulting error in temperature differences due to distortion of the heat flow around the sensor, to sensor drift, and other sensor characteristics shall be less than 1 %.

6.8.2.3 Methods of Attachment—The surface temperatures of the specimens are most often measured by means of permanently mounted thermocouples placed in grooves cut into the surface plates. Precautions shall be taken to ensure that the thermocouple is thermally anchored to the surface being measured. This method of instrumentation is employed when the contact resistance between the specimen and the surface plates is a small fraction of the specimen thermal resistance. The hot- and cold-surface assembly plate sensors on each side are sometimes connected differentially. Thermocouples mounted in this manner shall be made of wire not larger than 0.6 mm in diameter for large apparatus and preferably not larger than 0.2 mm for small apparatus.

NOTE 13—This method of deploying thermocouples is traditionally used for compressible specimens and for rigid specimens possessing flat surfaces that have a thermal resistance of greater than $0.2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ($1 \text{ h ft}^2 \text{ F/Btu}$) at ambient conditions.

NOTE 14—For rigid specimens not satisfying the requirements of 6.8.2.2, two techniques for attaching temperature sensors are recommended. Small grooves may be cut into the surfaces of the specimens and thermocouples can be affixed into these grooves. As an alternative, thermocouples may be installed onto the surfaces of the specimen and thin sheets of a compressible homogeneous material interposed between the specimen and surface plates. In this latter case, an applied force should be

used as indicated in 6.7 to ensure sufficient surface contact. For either of these applications, thermocouples shall be made of wire not larger than 0.2 mm in diameter.

6.8.2.4 Electrical Isolation—Temperature sensors can be either completely insulated electrically from the surface plates or grounded to the surface plate at one location. Consequently, thermocouples connected differentially can only have a single junction ground. Computations or experimental verifications, or both, shall be performed to confirm that other circuits do not affect the accuracy of the temperature measurements.

6.8.2.5 Number of Sensors—The number of temperature sensors on each side of the specimen in the metering area shall not be less than $10 \times \sqrt{A}$, or 2, whichever is greater.

NOTE 15—It is recommended that one temperature sensor be placed in the center of the metered section and that additional sensor be uniformly distributed radially.

6.9 Thickness Measurements—A means shall be provided for measuring the thickness of the specimen, preferably in the apparatus, to within 0.5 %.

6.10 Metered Section Power Measurement—Dc power is highly recommended for the metered section. Ac power may be used but the user should note that ac power determinations are more prone to error than dc measurements. The power to the metered section is determined with a wattmeter or from voltage and current measurements across the heater in the metered section. The voltage taps for this measurement should be placed to measure the voltage from the mid-point of the gap. The current can be determined from the voltage drop across a precision resistor placed in series with the metered section heater.

6.11 Electrical Measurement System—A measuring system having a sensitivity and accuracy of at least ± 0.1 K shall be used for measurement of the output of all temperature and temperature difference detectors. The system shall have sufficient sensitivity to measure the gap imbalance to a level equal to 1 % of the imbalance detector output that satisfies the requirement of 6.8.1.2. Measurement of the power to the metered section shall be made to within 0.2 % over the entire operating range.

6.12 Performance Checks—When a new apparatus is commissioned or an apparatus has undergone significant refurbishment, a series of careful checks shall be performed before initiating routine testing.

6.12.1 Planeness—The planeness of each surface plate shall be measured. See 6.3.1.1.

6.12.2 Temperature Measurements—With specimens installed in the apparatus, the coolant supply to the cold surface assembly shut off, and no electrical power being supplied to any of the heaters, mount the apparatus inside the enclosure. Allow the system sufficient time to come to thermal equilibrium. With no energy being supplied to the apparatus, note the output of all of the temperature sensors. The temperature sensors shall have an output that agrees to within the uncertainty prescribed in 6.8.2.2. The output of the imbalance detection circuit shall be within the noise level of the electrical measurement system.

6.12.3 Imbalance Detection—Determine the maximum imbalance that can be allowed that satisfies the requirements in

6.8.2.2. With the apparatus energized and operating normally, note the thermal resistance of a specimen and the imbalance detector output at equilibrium. Repeat the test at various levels of imbalance. Linearly fit the thermal resistance data as a function of bias. The slope of this relationship will define the maximum imbalance detector output that can be allowed during routine operation.

NOTE 16—The number of bias levels that need to be analyzed will depend on the quality of the curve fit; the scatter within the data set, as defined by twice the standard deviation, shall be less than the noise level of the electrical measurement system as defined in 6.11.

6.12.4 Edge Heat Losses—Edge heat losses give rise to the greatest measurement errors when the specimens approach the maximum specified thickness and thermal resistance. This series of experiments will determine which edge loss strategies must be employed to maintain edge losses to levels prescribed by this method.

6.12.4.1 Install specimens in the apparatus that approach the apparatus limits described above and instrument these specimens with the edge temperature sensors described in 6.6. Do not install any components described in 6.6 to reduce edge heat loss. While performing a test, verify that the difference between the specimen mean temperature and edge temperature satisfy the requirements of 6.6. Add additional edge loss apparatus components (edge insulation, secondary guard, enclosure) until the requirements of 6.6 are satisfied. These experiments will define the required levels of edge loss that shall be incorporated into the routine testing. In extreme cases, the secondary guard may have to be biased to satisfy these requirements; include these biases as part of the routine test procedure.

6.12.5 Emittance of Surface Plates—The emittance of the surfaces can be experimentally verified by testing an air gap, where the thickness of the air gap is limited to prevent the onset of convection. The heat flow rate per unit temperature difference is the sum of the thermal conductance of air and $4\sigma T_m^3 / (2/\epsilon - 1)$. A best fit of the plot of the heat flow rate per unit temperature difference and the inverse of the air space thickness supplies both the thermal conductivity of the air and $4\sigma T_m^3 / (2/\epsilon - 1)$. From this plot, the plate emittance can be verified (42).

6.12.6 Overall Design Verification—When all of the other checks have been successfully completed, tests shall be performed on specimens that are traceable to a national standards organization. These tests shall cover the range of temperatures for which the apparatus has been designed. Verification of the apparatus may be limited by the temperature range of available standards. See 5.7.

7. Specimen Preparation and Conditioning

7.1 Specimen Selection—Only those specimen selection factors important to the performance of the apparatus are considered here. Factors related to the specimens' thermal properties are typically described in material specifications. When two specimens are required, the specimens should be selected to be as similar in thickness and thermal characteristics as possible. The use of Test Method C 518 can be used to check the similarity of the specimens' thermal characteristics.

7.1.1 Thickness—The maximum specimen thickness that can be measured to a given accuracy depends on several parameters, including the size of the apparatus, thermal resistance of the specimen, and the accuracy desired. To maintain edge heat losses below approximately 0.5 %, for a guard width that is about one-half the linear dimension of the metered section, the recommended maximum thickness of the specimen is one-third the maximum linear dimension of the metered section. For more specific quantitative information on this limitation see Refs (1,5,7,8) and adjunct material given in this test method.

7.1.2 Size—The specimen shall be sized to cover the entire metered section and guard area when possible. It is desirable to cover the gap between the guarded-hot-plate and the primary guard when sample size is limited. The guard portion of the volume between the heating and cooling plates should be filled with material having similar thermal conductance characteristics as the specimen. When the specimen has a high lateral conductance such as a dense solid, a gap between the metered section and the primary guard shall be provided within the specimen. Refer to 7.2.3 for special precautions.

7.1.3 Homogeneity—Specimens exhibiting appreciable inhomogeneities in the heat flux direction shall not be tested with this method. There are two potential problems in attempting to determine the heat flux through highly inhomogeneous specimens. One is related to the interpretation and application of the resulting data, see Practice C 1045. The other is the degradation in the performance of the apparatus. If the specimen is highly inhomogeneous, that is, the heat flux varies appreciably over the metered section, several errors can be significantly increased. The plate temperature distribution can deviate appreciably from isothermal conditions which, in turn, can cause large uncertainties in the average temperature difference across the specimen. The increased plate temperature variations can also lead to increased gap and edge heat losses. The importance of measuring the plate or specimen surface temperatures at numerous points is greatly increased under such conditions.

7.2 Specimen Preparation—Prepare and condition the specimens in accordance with the appropriate material specification. Use the following guidelines when the material specification is unavailable. In general, the surfaces of the specimen should be prepared to ensure that they are parallel with and have uniform thermal contact with the heating and cooling plates.

7.2.1 Compressible Specimens—The surfaces of the uncompressed specimens may be comparatively uneven so long as surface undulations are removed under test compression. It may be necessary to smooth the specimen surfaces to achieve better plate-to-specimen contact. If the apparent thermal conductivity of the contact void is greater than that of the specimen, compressible or otherwise, the measured heat flux will be greater than the heat flux that would be obtained if the voids were absent. This may often be the case at higher temperatures where radiant heat transfer predominates in the void. For the measurement of compressible specimens, the temperature sensors are often mounted directly in the plate surfaces. Also, plate spacers may be required for the measurement of compressible specimens.

7.2.2 Rigid and High Conductance Specimens—The measurement of rigid specimens or high conductance specimens requires careful surface preparation. First, the surfaces should be made flat and parallel to the same degree as the guarded-hot-plate. If the specimen has a thermal resistance that is sufficiently high compared to the specimen-to-plate interface resistance, temperature sensors mounted in the plates may be adequate. However, for materials such as plastics or ceramics, when the thermal conductivity of the material exceeds 0.1 W/m·K, the following techniques shall be used to ensure accurate surface temperature measurement.

7.2.2.1 In some cases it is necessary to mount the temperature sensors directly on the specimen surfaces or in grooves in the specimens. Under vacuum conditions, the slightest space between plate and specimen is essentially an infinite thermal resistance (except for radiative heat transfer). Under these conditions extreme heat flux nonuniformities will occur. In any event the user should always try to minimize the ratio of contact resistance to specimen resistance and to strive for a constant ratio over the entire surface.

7.2.2.2 Another potential solution (that must be used with caution) is to mount a compressible thin sheet (for example, a soft rubber or thin fibrous pad) between the plates and specimen to improve the uniformity of the thermal contact. When this procedure is used, temperature sensors shall be instrumented in or on the surface of the specimens to ensure accurate temperature measurement of the specimen surface. An applied force should be used as in 6.7 to ensure sufficient surface contact.

7.2.3 Anisotropic Specimens—Specimens that have a high lateral to axial conductance ratio require that a low conductance gap be created in the specimen directly in line with the gap between the metered section and the primary guard.

7.2.4 Loose-Fill Specimens—The measurement of loose-fill specimens requires special handling, conditioning, and measurement techniques. The user is directed to Practice C 687 for details.

7.3 Specimen Conditioning—Condition the specimens either as stated in the material specification or where no guideline is given, at $22 \pm 5^\circ\text{C}$ ($72 \pm 3^\circ\text{F}$) and $50 \pm 10\%$ relative humidity for a period of time until less than a 1 % mass change in 24 h is observed.

NOTE 17—Specimens can be conditioned at different conditions in order to determine the effect on the thermal properties of the specimens. Conditioning environments shall be reported with the test results.

8. Procedure

8.1 For a double sided test, select a pair of test specimens as outlined in Section 7.

8.2 Measure and record the specimen mass and dimensions. Also see 8.12.

8.3 Install the specimen into the apparatus at the desired test thickness.

8.4 Install the appropriate secondary guarding and an environmental chamber (as required).

8.5 If the test is to be conducted with gases other than air in the specimen-plate assembly, purge the environmental chamber and backfill with the desired gas. Care should be taken to limit

the pressure of the fill-gas to below its condensation point at the lowest temperature expected within the chamber. Since the measured heat flux is dependent on both the type of fill gas and pressure, record both of these parameters.

8.6 Adjust the heating and cooling systems to establish the desired test conditions. For guidance in establishing test temperatures, refer to Practice C 1058. The ambient temperature should be the same as or slightly above the mean temperature of the test. This may require the use of a temperature controlled surrounding. This can be accomplished utilizing a controlled perimeter heater and insulation materials to aid in the control of the surrounding temperature.

8.7 Record the start time and date of the test. Begin data acquisition. The recorded data shall include: the date and time of data acquisition; power to the guarded-hot-plate; hot side guarded-hot-plate surface temperature; hot side guard temperatures; cold surface assembly temperatures; controlled environment ambient temperature and relative humidity; temperature difference or thermopile output across the gap between the guard and metered section; and calculated heat flux and estimated thermal property of interest.

NOTE 18—Thermal steady-state is the time required for the test apparatus to stabilize. This varies considerably with the apparatus design, specimen to be measured, and test conditions. Generally, however, the stabilization time is on the order of hours. Stabilization times generally increase with thick specimens, specimens with low thermal diffusivity and is dependent on the mass of the metered section area. Measurements in a vacuum and on microporous materials create small monotonic changes over a long period of time and may take longer to stabilize.

8.8 Thermal steady state must be achieved for this test method to be valid. To determine if steady state is achieved, the operator must document steady state by time averaging the data, computing the variation and performing the following tests on the data taken in Section 8.

8.8.1 Thermal steady state for the purpose of this test method is defined analytically as:

8.8.1.1 The temperatures of the hot and cold surfaces are stable within the capability of the equipment at the test conditions. Ideally an error analysis will determine the magnitude of the allowable differences, however the difference is usually less than 0.1 % of the temperature difference.

8.8.1.2 The power to the metering area is stable within the capability of the equipment. Ideally an error analysis will determine the magnitude of the allowable differences, however the difference is usually less than 0.2 % of the average result expected.

8.8.1.3 The required conditions above exist during at least four intervals 30 min in duration or four system time constants, whichever is longer.

NOTE 19—The thermal time constant of the system is the time required to come to within $1/e$ (37 %) of the fixed value after a step thermal disturbance of the system. The thermal time constant in the constant power mode is the time required to come to within 37 % of the final temperature. The thermal time constant in the constant temperature mode is the time required to come to within 37 % of the final power. The thermal time constant of a system can be approximated from the thermal diffusivities of the system components, but is generally determined experimentally.

8.9 After achievement of the desired steady-state as defined in 8.8.1, three successive repeat data acquisition runs shall be

completed. These runs shall be conducted at intervals of at least 30 min and should not be less than the thermal time constant of the system (see Note 19). This combination of three runs shall be considered a valid test if each datum obtained for each measured variable meets the following criteria.

8.9.1 The data do not differ from the mean by no more than the uncertainty of that variable, see A1.5.

8.9.2 The data obtained does not change monotonically with time. This is determined by comparing the average result of the final three test periods to the averages of the previous four periods. Graphing of the test parameters versus time or monitoring the slope of the data are techniques for determining monotonic conditions.

8.9.3 If the data continues to drift, the test shall be considered incomplete and further data acquisition sets shall be conducted until thermal steady state is achieved. Drift, even at low levels, may indicate that either the specimen characteristics are changing or the system is not at steady-state. For further details see Refs (3,12,13).

8.10 Prior to terminating the test, measure and record the pressure of the chamber.

8.11 Upon completion of the thermal test outlined above, remove the specimen and examine the system components, such as temperature sensor mounting, for proper placement and operation.

8.12 Determine the specimen thickness and weight after the test to ensure that they have not changed from the initial condition. Record any changes in the physical characteristics of the specimen.

9. Calculation

9.1 The primary data required for this test method include electrical power, surface temperatures, area, and thickness. Of these, only thickness is generally a directly measured quantity. The others are either calculated from other more fundamental measurements or are converted by an electrical device. The manner in which these variables can be obtained is discussed in 8.9 and below.

9.2 *Heat Flow*—The heat flow to be reported is that which passes through each specimen. This is equal to the power generated by the metered section heater. For the double-sided mode of operation, only one-half the power generated by the heater flows through each specimen. Determine the power, Q , from emf, E , and current, I , and calculate as follows:

$$Q = E \times I \quad (2)$$

9.3 *Metered Section Area*—Determine the metered section area, A , from the area, A_m , of the guarded-hot-plate and the gap area, A_g . If there is no discontinuity in specimen characteristics in the gap region, the metered area is calculated as follows:

$$A = A_m + \frac{A_g}{2} \quad (3)$$

For high precision measurements, this assumption that the gap contributes half of its area to the effective metered section area, A , may need to be verified for the particular apparatus used. If there is a discontinuity between the specimen in the metered section and the guard region, this equation is modified slightly, as in ISO 8302, to include the effect of heat flux distortion in the gap region:

$$A = A_m + \frac{A_s \lambda}{2\lambda} \quad (4)$$

Where significant expansion, or contraction, of the guarded-hot-plate is known during a test, appropriate corrections to the area shall be made.

9.4 *Heat Flux*—The heat flux is obtained from the ratio of the heat flow, Q , and the total metered section area, A , and is calculated as follows:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

9.5 *Temperature*—Electrical readings from the temperature sensors are normally converted to temperature using a mathematical equation based on either the sensor's calibration curve or an appropriate reference such as a thermocouple voltage table.

9.6 *Density*—The metered section area specimen density, ρ_m , or the sample density, ρ_s , where metered section area density cannot be obtained, are to be reported as the average of the two pieces. The equation for density, is the following:

$$\rho_m = \frac{m}{A \times L} \quad (6)$$

or:

$$\rho_s = \frac{m_s}{A_s \times L}$$

9.7 *Thermal Transmission Properties*—These properties shall be reported only in accordance with the requirements and restrictions of Practice C 1045.

10. Report

10.1 To be in conformance with this test method, report the following:

10.1.1 The report shall be identified with a unique numbering system to allow traceability to the individual measurements taken during each test performed,

10.1.2 The average values as obtained from the test. Standard deviation about that average. The results may be reported in a form similar to that shown in Fig. 3,

10.1.2.1 Identification of the test organization, responsible person in charge, test operator (optional) and the test sponsor,

10.1.2.2 The generic name, or other identification required to provide a complete and detailed description of the tested material. For hygroscopic materials, such as concrete and wood, the moisture content should also be given,

NOTE 20—A generic description in addition to the brand name should be reported where possible.

10.1.2.3 Information regarding the specimen preconditioning,

10.1.2.4 Variables that effect thermal transmission properties, such as fill-gas and pressure, shall be specified when applicable,

10.1.2.5 The dimensions of the metered section and guard(s) and their relationship to the overall specimen dimensions (m). The plate emittance,

10.1.2.6 Specimen orientation and the direction of heat transfer during the test,

10.1.2.7 The total area of the specimen (m²),

10.1.2.8 The specimen density of the metered section area or sample density where metered section area density cannot be obtained (kg/m³),

10.1.2.9 The thickness of the specimen(s) within the metered section (m),

10.1.2.10 The area averaged temperatures of both hot and cold specimen surfaces (K),

10.1.2.11 Net steady-state average heat flux through the specimen (W/m²),

10.1.2.12 Any thermal transmission properties calculated and reported and their estimated error, and

10.1.2.13 The test date and time, the time required for steady temperature conditions, the time to reach steady-state, the data acquisition time period, frequency of data collection and the end date and time.

10.2 The following is optional information that may be included in the report:

10.2.1 Values for guard loss, back side energy loss and other losses included in the net energy calculation (W/m²), and

10.2.2 A full description (or references) of test procedures and data analysis techniques used.

10.3 When certification of the test results is required, include the date of the latest apparatus verification and a description of the procedures used. References for the verification report(s) shall also be included. Where applicable, include a statement of laboratory accreditation of the test facility used, including date of latest inspection.

10.3.1 Where agreed upon between the customer and the test laboratory, less maybe reported but the remainder of the results shall be made available.

NOTE 21—**Caution:** Where this test method might be specifically referenced in published test reports and published data claims, and where deviations from the specifics of the test method existed in the tests used to obtain said data, the following statement shall be required to accompany such published information: "This test did not fully comply with following the provisions of Test Method C 177." This statement shall be followed by a listing of specific deviations from this test method and any special test conditions that were applied.

11. Precision and Bias

11.1 This section on precision and bias for the guarded hot plate apparatus includes a discussion of; general statistical terms; statistical control; factors affecting test results; ruggedness tests; interlaboratory comparisons conducted by ASTM Committee C-16; proficiency testing conducted under the auspices of the National Voluntary Laboratory Accreditation Program (NVLAP); and error propagation formulae.

11.2 *General Statistical Terms*—The accuracy of a test result refers to the closeness of agreement between the observed value and an accepted reference value. When applied to a set of observed values, the accuracy includes a random component (imprecision) and a systematic component (bias). The variability associated with the set of observed values is an indication of the uncertainty of the test result. Additional information on statistical terminology is available in Terminology E 456.

11.3 *Statistical Control*—The user of the guarded-hot-plate apparatus shall demonstrate that the apparatus is capable of performing in a consistent manner over time (35). The use of

Test Report

Date: _____ Test Report Number: _____

Operator: _____ Duration of Test: _____

Specimen Identification: Product, name, manufacturers description.
 Specimen Characteristics: Unique characteristics such as degree of homogeneity or anisotropy, density (optional).
 Specimen Conditioning: Temperature, time, humidity.
 Specimen Dimensions and Mass: Before and after conditioning and after measurement.

Apparatus Description: Size, shape and orientation of plates. Single or double-sided operation, description of secondary guarding, unique procedures.

Experimental Results

Variable	Measured Value	Uncertainty	
		Systematic	Random
Q, W			
T _h , K			
T _c , K			
T _m , K			
ΔT, K			
A, m ²			
L, m			
Fill gas pressure, Pa			
Other			

Derived thermal transmission properties including the applicable range of conditions shall be in conformance with Practice C 1045.

FIG. 3 Example Test Report Form

control charts (see Manual 7 (34)) to monitor the operation of the guarded hot plate is one recommended way to monitor the control stability of the apparatus. When possible, it is recommended that a reference material traceable to a national standard laboratory be used as the control specimen. Ideally, the long-term variation should be no greater than the short-term variability.

11.4 *Factors Affecting Test Results*—Experiments and theoretical analyses have identified two principal (systematic) errors that affect the operation of an idealized guarded hot plate apparatus. These errors are edge heat flows at the periphery of the specimens; and, heat flow across the gap due to a thermal imbalance. Other errors studied include the effect of gap width on the heat flow; and, the proper determination of the metered section area. These errors and others are discussed in detail in A1.3.

11.4.1 *Edge Loss Errors*—These have been found to depend on the size (and type) of the guard, the specimen thermal

conductivity and thickness, and ambient temperature (7,18,20,21,31,33). By using a sufficiently wide guard (see Section 6), appropriate levels of edge insulation, and proper selection of the ambient temperature (see Section 8), the edge loss error can be reduced to a negligible value relative to the specimen heat flow (see Annex A4.2). There is only limited experience (at room temperature) with measurement of apparent conductivity at large thickness² (above 30 cm), but errors may be expected to be above 2 %, especially if the user does not reduce the problems associated with long time constants and large lateral heat flows (31).

11.4.2 *Gap Imbalance Error*—These have been found to depend on several parameters including the temperature difference, the gap geometry, the structural support system, the wires crossing the gap (number, size, and type), the gap fill material (gas or insulation), the emittance of the gap surfaces, and the specimen material in the vicinity of the gap (5,6,8,18,22,36). The resulting heat flow due to a temperature

imbalance can be obtained either by calculation based on the above parameters or empirical data. An empirical relationship for the gap heat flow can be determined by purposely introducing a temperature imbalance across the gap and measuring the resulting change in the specimen heat flow (see A1.4.3).

11.5 Ruggedness Tests—The results of one ruggedness study for a 200 mm² guarded hot plate and two materials having different thermal conductivity's have been reported (37). Matched pairs, 85 mm thick, of polyurethane foam and silicone rubber were measured at a mean temperature of 297 K and a temperature difference of 23 K. For each specimen, the width of edge insulation was set at one of five levels (0, 12.7, 25.4, 50.8, and 76.2 mm) while the ambient temperature was varied at one of three levels. The results indicate that the edge losses are reduced with edge insulation but only become zero when the ambient temperature is at one specific value. The optimum ambient temperature appears to be a function of specimen thickness and thermal conductivity, and edge insulation thickness.

NOTE 22—As noted in Section 8, the value of the ambient temperature is set to either the same value as the mean temperature of the test or a value slightly above the mean temperature. The user should determine the optimum value for their apparatus and test conditions by using the sensitivity analysis described in A4.2. This dependence may change appreciably for different specimens or apparatus conditions and, therefore, should be done under typical test conditions.

11.6 Interlaboratory Tests—The results of three published interlaboratory tests for guarded-hot-plate apparatus are discussed below. The results, where appropriate, state an index of precision (between laboratory) of two-standard deviation limits (2s). Certain aspects of the interlaboratory tests were not conducted completely in accordance with the requirements of Practice E 691, for example, the number of test laboratories was less than six in one study and none of the studies required replicates. Furthermore, a study involving a variety of materials is needed. Consequently, a general statement for the index of precision and bias that covers all conditions and materials is unavailable. In the interim, the user is directed to the interlaboratory tests if information on precision and bias is needed (see Practice C 687 for loose-fill materials).

11.6.1 In 1951, results of an interlaboratory comparison were reported (38) for 20 guarded-hot-plate apparatus from 17 laboratories. The plates ranged in size from 200 to 600 mm square. Different (numbered) pairs of corkboard (25 mm thick) were measured by each laboratory at a mean temperature from 266 to 322 K. The data from 15 of the 20 apparatus (75 %) were within ± 3 % of the mean value as determined by the National Bureau of Standards (now the National Institute of Standards and Technology). The maximum deviations were + 13 and - 16 %.

11.6.2 In 1985, results of a third round of interlaboratory comparisons were reported (41) for five large guarded-hot-plate apparatus ranging from 610 to 1219 mm² and 1016 mm diameter (the last apparatus mentioned being a circular line-heat-source guarded-hot-plate). The same specimens of fibrous-glass blanket (16 kg/m³) were circulated to each laboratory. Matched pairs were tested at 297 K and thicknesses of 25.4, 50.8, 76.2, and 101.6 mm. Imprecision of the data versus a semi-empirical model for a density range of 11 to 20

kg/m³ were 1.9, 2.3, 2.6, 2.9 % (2s level) at thicknesses of 25.4, 50.8, 76.2, 101.6 mm, respectively.

11.6.3 In 1988, results of a interlaboratory comparison were reported (30) for seven high-temperature guarded-hot-plate apparatus. The plates ranged in size from 203 to 406 mm in diameter and 300 to 610 mm². Different matched pairs of fibrous alumina-silica and calcium silicate were measured by each laboratory over a mean temperature range from 330 to 701 K. Reference equations based on NIST-Boulder corrections were fit to the data. Imprecision in the deviations from the model were 15 and 16 % (2s level) for fibrous alumina-silica and calcium silicate, respectively. It was established that a significant percentage of the standard deviation in this comparison was due to material variability and not apparatus error.

11.7 Proficiency Tests—In 1985, the results of a series of proficiency tests conducted for NVLAP over a four-year period were reported (39) for guarded-hot-plate apparatus (plate size not reported). Different specimens of four thermal insulation materials were distributed to each laboratory for testing. The materials were expanded polystyrene; foam board; low-density glass-fiber batt (8 to 16 kg/m³); and, high-density glass-fiber batt, foil-faced (64 kg/m³). Each laboratory reported a single test result, that is, no replicates were conducted. Results of the proficiency tests are summarized in Table 1. The index of precision (between laboratory) is expressed as a percentage for the one-standard deviation limit(s) divided by the mean of the test result, or one-coefficient of variation (CV %).

11.8 Error Propagation—Several formulae are available (40) for determining the apparatus uncertainty by error propagation. For guidelines on using a standard procedure, the user is referred to ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (32). Strictly speaking, determining a statement of uncertainty for a test result requires treating random and systematic errors separately. A description of random and systematic errors and possible sources of error are discussed below.

11.8.1 Random Error; δ_r —In a measurement, random errors (imprecision) are considered to be the sum total of all the small

TABLE 1 NVLAP Proficiency Tests for Guarded-Hot-Plate Apparatus Ref (39)

Material	Nominal Thickness, mm	Thermal Conductivity Group Mean, W/(m K)	Number of Labs	Coefficient of Variation, %	Round
Expanded polystyrene board	25	0.037	6	1.80	10
Foam Board, rigid	25	0.040	9	2.52	4
Glass-fiber batt	25	0.040	10	2.15	5
Glass-fiber batt	25	0.040 ^A	6 ^A	2.26 ^A	7 ^A
Glass-fiber batt	25	0.039 ^A	7 ^A	2.82 ^A	3B ^A
Glass-fiber batt	25	0.040	9	3.28	3A
Glass-fiber batt	25	0.040	7	3.43	7
Glass-fiber batt	25	0.040	9	4.66	3B
Glass-fiber batt, foil faced	25	0.032	9	0.98	6
Glass-fiber batt, foil-faced (stacked)	50	0.033	7	1.45	9
Glass-fiber batt, foil faced	25	0.032	8	1.95	8

^A Recalculation with one or more laboratories excluded from the group statistics because their test results deviated from the pre-characterized value by more than 6 %.

(negligible) independent errors that are uncontrolled, for example small fluctuations in environmental conditions or plate temperatures. Random errors are assumed normally distributed, uncorrelated, and preferably small. In general, random errors are a function of the capabilities of the control system and, to a lesser extent, the measurement system.

11.8.2 *Systematic Error, δ_s* —A systematic error (bias) is a fixed deviation that is inherent in each and every measurement. If the magnitude and direction of the systematic error are known, the user can make appropriate correction(s) to the measured value. Under such circumstances a justification for the correction should be provided. In general, the magnitude of the error, $|\delta_s|$, is estimated by experience or judgment.

11.8.3 *Statement of Uncertainty*—The statement of uncertainty requires an expression having credible limits for its inaccuracy. Different traditions and usage have resulted in different expressions of uncertainty that may be summarized as

follows: both imprecision and bias negligible; imprecision negligible, bias not negligible; neither imprecision nor bias negligible; and, imprecision not negligible, bias negligible.

11.8.4 *Sources of Errors*—The uncertainty of the apparatus as determined by propagation of errors should consider the error in each of the separate measurements used to determine the test result. For a guarded-hot-plate apparatus, these errors in measurements are the uncertainty in: heat flow δQ ; temperature difference, $\delta \Delta T$; metered section area, δA ; and specimen thickness, δL . These errors and an example are discussed in A1.3.

12. Keywords

12.1 error analysis; guarded-hot-plate; heat flow; heat flux; steady-state; thermal conductivity; thermal resistance; thermal transmission; thermal conductance; thermal testing

ANNEX

(Mandatory Information)

A1. THICKNESS MEASUREMENT, LIMITATIONS AND MEASUREMENT UNCERTAINTY

A1.1 *Importance of the Thickness of the Insulation Specimens in Guarded-Hot-Plate Measurements*—The thickness of the specimen as installed in the apparatus determines both the density of the material and the temperature gradient applied to it during the measurement of the thermal property. If the thickness of a specimen is changed from its room-temperature value by thermal effects (thermally reversible expansion or contraction, or thermally induced irreversible shrinkage or expansion of the specimen), or by compression, then use of the room-temperature thickness outside the apparatus will lead to error in the determination of the apparent conductivity (or resistivity) of the specimen. A given relative (percentage) error in the thickness leads to an equal relative error in the determination of the conductivity. For measurements of thermal properties at mean specimen temperatures near room temperature the error in neglecting any changes in thickness may be negligible, but this can be ascertained only by observation in the specific case at hand.

A1.2 *Suggested Ways to Measure Thickness of Incompressible Specimens*—In determining the thickness of a specimen, one assumes that it is properly shaped, so that the measured thickness is valid. However, two different situations may sometimes occur to affect the thickness measurement. The shape of the specimen may be distorted by warping or bowing at the time it is first installed in the apparatus. In this case, either the (flexible) specimen should be compressed enough to remove the distortion when installed, (or, preferably, a specimen of better quality should be selected). Independent of, the specimen may undergo a change of shape as it is subjected either to high mean temperatures or to large temperature gradients, due to chemical changes occurring in the specimen at high temperatures. In this case it is difficult to define what

the thickness of the specimen actually is during the measurement. The thickness of the specimen should be measured both before and after the thermal transmission property is measured, to show whether such dimensional changes are occurring. Any warping or bowing of the specimen, before or during measurement of thermal properties, adds to the uncertainty in the value of thickness. Some materials such as polymers have large coefficients of expansion and the material tends to bow unless a small thickness and temperature difference across the specimen is used.

A1.2.1 The recommended procedure for measuring specimen thickness is to measure the thickness while installed in the apparatus. This is necessary if the correct temperature gradient actually applied to the specimen during the measurement of the thermal property is to be obtained. Rigid rods may be securely installed extending laterally from the outer edges of the metered area/primary guard assembly, at two or three equally spaced locations along the circumference of the plate. The portion of the rod extending from the plate should be smooth and parallel to the plane of the plate surface. Alternatively, the plates may be machined with flat, horizontal plates extending from the circumference. Similar rods (or plates) are likewise located on each auxiliary heater plate, at the same circumferential positions, vertically (within 5° of arc) above or below the rods on the metered area/primary guard assembly.

A1.2.1.1 With no specimens installed, with the heater plates contacting each other in their usual order, and taking care not to change the plate separation, measure the separation between each vertical pair of rods on two adjacent plates with a vernier caliper. Compute the arithmetic mean of the plate separation for each pair of adjacent plates. Then, with specimens installed between the plates in the apparatus, and with the usual mechanical loading applied, measure the separation between

the pairs of rods on adjacent plates, taking care not to change the plate separation. Compute the arithmetic mean. Subtract the mean separation obtained with no specimen from the mean separation with the specimen present, for corresponding pairs of plates, to obtain the as-installed thickness of each specimen. The standard deviation about the average of values from repeated measurements of the plate separation, starting from total disassembly, gives a statistical measure of the reproducibility. If contact cannot be made between the plates, standard spacers can be inserted between the plates. Bringing the plates in contact with the spacers can determine the adjustment in specimen measured thickness required.

A1.2.1.2 The accuracy of this procedure is equal to the imprecision with which the vernier can be read. The accuracy of this test method depends on the precision with which the rods are mounted in a true horizontal orientation, and on not changing the plate separation during the measurement. The standard deviation about the average of values from repeated measurements of the plate separation, starting from total disassembly, gives a statistical measure of the reproducibility.

A1.2.2 An alternative is to place the specimen on a flat surface and measure the thickness at various points across the specimen with a thickness gage mounted above the specimen. The zero is first established by resting the foot of the gage on the flat surface. The specimen is then measured. This procedure has the advantage that specimen flatness and warp can be measured. Thickness is measured typically in at least five different locations across the full specimen and within the metered section to establish the metered thickness within the apparatus. The thickness, when applicable, should be measured after the test to monitor any significant changes that may have effected the results.

A1.2.2.1 The accuracy of this test method is equal to the imprecision with which the gage can be read. The accuracy and reproducibility of this test method depends on the ability of the operator to reproduce the amount of force exerted on the specimen especially in the case of compressible specimens.

A1.2.3 Another alternative is to use a micrometer or vernier calliper. This assumes that the specimen is not bowed or warped, that should of course be ascertained. During a measurement of thickness with a calliper, prevent the narrow jaws of the measuring tool from penetrating into the surface of the specimen. Cut two small pieces of flat, rigid rectangular metal sheet, about 20 by 40 mm and 0.5 to 1.0 mm thick. Measure the combined thickness of the two metal rectangles; then measure the thickness of the specimen while holding one metal piece under each jaw, between the surface of the specimen and the jaws of the micrometer or calliper. Be sure to subtract the combined thickness of the two metal plates from the total thickness of specimen plus metal pieces, to obtain the net specimen thickness. By this method measure the thickness at eight different, equally spaced locations around the outer margin of the specimen.

A1.2.3.1 The accuracy of this procedure is equal to the precision with which the vernier (or micrometer) can be read. The accuracy and reproducibility of this test method is lower than that described above in A1.2.1 and A1.2.2, due to the

variable pressure used by different people in measuring the specimen between the jaws of the micrometer or calliper.

A1.3 *Limitations Due to Apparatus:*

A1.3.1 *Limitations Due to Contact Resistances*—When testing a rigid specimen of high thermal conductance (that is, specimens of a material too hard and unyielding to be appreciably altered in shape by the pressure of the heating and cooling units), even small, non-uniformities of the surface of both the specimen and the apparatus (surfaces not perfectly flat) will allow contact resistances not uniformly distributed between the specimens and the plates of the heating and cooling units.

A1.3.1.1 These will cause nonuniform heat flow-rate distribution and thermal field distortions within the specimens; moreover, accurate surface temperature measurements will be difficult. For specimens having thermal resistances less than $0.1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$, special techniques for measuring surface temperatures will be required. Metal surfaces should be machined or cut flat and parallel and stress-relieved.

A1.3.2 *Upper Limits for the Thermal Resistance:*

A1.3.2.1 The upper limit of thermal resistance that can be measured is limited by the stability of the power supplied to the metered section, the ability of the instrumentation to measure power level and the extent of the heat losses or gains due to temperature imbalance errors between the central and guard sections of the specimens and of the metered section.

A1.4 *Limits to Temperature Difference:*

A1.4.1 Providing uniformity and stability of the temperature of the hot and cold surfaces of the plates, the noise, resolution and temperature measurements can be maintained within the limits outlined in Section 6, temperature differences as low as 5 K, when measured differentially, can be used. Lower temperature differences shall be reported as not complying with this standard. See Practice C 1058.

A1.4.2 If temperature measurements of each plate are made by means of thermocouples with independent reference junctions, the accuracy of the calibration of each thermocouple may be the limiting factor in the accuracy of measured temperature differences. In this case, it is recommended that temperature differences of at least 10 K to 20 K are used in order to minimize temperature-difference measurement errors.

A1.4.3 Higher temperature differences are limited only by the capability of the apparatus to deliver enough power while maintaining required temperature uniformity.

A1.4.4 *Maximum Specimen Thickness:*

A1.4.4.1 The boundary conditions at the edges of the specimens due to the effects of edge insulation, of auxiliary guard heaters and of the surrounding ambient temperature will limit the maximum thickness of specimen for any one configuration, as described in Section 6. For composite or layered specimens, the mean measurable thermal conductivity of each layer should be less than twice that of any other layer.

A1.4.4.2 This is an approximation and the results do not necessarily imply the measurement of conductivity of each layer. The accuracy will remain close to that predictable for

tests on homogeneous specimens. No guidelines can be supplied to assess measurement accuracy when the requirement of 2.3 is not met.

A1.4.5 *Minimum Specimen Thickness:*

A1.4.5.1 The minimum specimen thickness is limited by contact resistances given in A1.3.1. Where thermal conductivity or thermal resistivity is required, the minimum thickness is also limited by the accuracy of the instrumentation for measuring the specimen thickness.

A1.4.5.2 The metered area, that is, the area of the specimen traversed by the heat flow-rate fed by the metered section, is related to the specimen thickness and to the gap width. As the thickness tends to zero, the metered area tends to the area of the metered section, while for thick specimens the metered area is bounded by the line defining the centre of the primary guard gap. To avoid complex corrections, this definition can be retained, provided the thickness of the specimen is at least ten times the width of the gap.

A1.4.6 *Maximum Operating Temperature:*

A1.4.6.1 The maximum operating temperature of the heating and cooling units may be limited by oxidation, thermal stress or other factors that degrade the flatness and uniformity of the surface plate and by changes of electrical resistivity of electrical insulations which may affect accuracy of all electrical measurements.

A1.4.7 *Vacuum Conditions:*

A1.4.7.1 Care must be taken if a guarded hot plate is used for measurements under vacuum conditions. If a high vacuum is desired, the materials used in the design of the apparatus must be carefully selected to avoid excessive outgassing under such conditions. Under vacuum conditions, especially at lower temperatures, serious errors can arise if care is not taken when installing heater and temperature sensor leads so as to minimize extraneous heat flow-rates and temperature measurement errors.

A1.4.8 *Apparatus Size:*

A1.4.8.1 The overall size of a guarded hot plate will be governed by the specimen dimensions that typically range from 0.2 to 1 m diameter or square. Samples smaller than 0.3 m may not be representative of the bulk material, while specimens larger than 0.5 m may create considerable problems in maintaining the flatness of the specimens and plates, temperature uniformity, equilibrium time and total cost within acceptable limits.

A1.5 *Limitations Due to Specimen:*

A1.5.1 *Thermal Resistance or Thermal Conductance:*

A1.5.1.1 *Specimen Homogeneity*—In inhomogeneous specimens, the thermal flux density both within the specimen and over the faces of the metered section area may be neither unidirectional nor uniform. Thermal field distortions will be present within the specimen and can give rise to serious errors. The region in the specimen contiguous to the metered section area and especially near the edges of this area is most critical. It is hard to give reliable guidelines on the applicability of the method in such cases. The major risk is that the imbalance errors, edge heat loss errors, etc., now unpredictable, can vary in an unpredictable way when inhomogeneities take different relative positions within the specimen.

A1.5.1.2 One way to try to estimate the error is to compare the results for two specimens from the same sample, selected so that they have as widely different a structure near the edges or the metered section area. If the two extremes cannot be identified, a number of specimens may have to be tested.

A1.5.1.3 In some samples, the variation in structure may occur over small distances. This is true for many thermal insulations. In such cases, it may be possible to use a single specimen cut larger than the apparatus. This over-size specimen is tested twice, in each case with the specimen carefully positioned so that the edges of the test area are exposed to the two extremes in structure. The two results are then compared and the difference credited to distortion. The portion of the specimen(s) protruding from the apparatus should be well insulated in the two tests to reduce the possibility of the exposed section increasing edge losses. The size and thickness of the specimen affects the size of the variations in structure that can be accommodated. The larger the test area, the smaller the effect on the results. The effect of distortion may either increase or decrease with specimen thickness.

A1.5.1.4 Direct thermal short circuits may exist between the surfaces of the specimens in contact with the plates of the heating and cooling units. The largest effect occurs when sections of material which conduct heat readily, with extended surface area on each side of the specimen, are connected by a path of low thermal resistance relative to other paths. The effect can best be identified by breaking the thermal paths, especially when the collecting surfaces can be disconnected from the rest of the path. Sheets of thermally insulating materials can be used at the critical surfaces to provide the break. Sheets made of finely ground cork, or a similar material 2 mm or more thick, work well. The surfaces must be ground to the same degree of flatness as the heating unit. The thermal resistance of these sheets can be determined in separate measurements. The net change in thermal resistance of the specimen, due to thermal shorting, can thus be determined. If greater than 1 %, another measurement should be made with thicker sheets imposed.

A1.5.2 *Temperature-Difference Correlation:*

A1.5.2.1 Thermal resistance or thermal conductance are often a function of temperature differences across the specimen. In the report, the range of temperature differences that apply to the reported values of the two properties must be defined, or it must be clearly stated that the reported value was determined at a single temperature difference.

A1.5.3 *Mean Measurable Thermal Conductivity of a Specimen:*

A1.5.3.1 In order to determine the mean measurable thermal conductivity (or thermal resistivity) of a specimen, the criteria of A1.3.1 shall be fulfilled. The specimen shall be homogeneous. Homogeneous porous specimens shall be such that any inhomogeneity has dimensions smaller than one-tenth of the specimen thickness. In addition, at any one mean temperature, the thermal resistance shall also be independent of the temperature difference established across the specimen.

A1.5.3.2 The thermal resistance of a material is known to depend on the relative magnitude of the heat transfer process involved. Heat conduction, radiation and convection are the primary mechanisms. However, the mechanisms can combine

or couple to produce non-linear effects that are difficult to analyze or measure even though the basic mechanisms are well researched and understood.

A1.5.4 The magnitude of all heat transfer processes depends upon the temperature difference established across the specimen. For many materials, products and systems, a complex dependence may occur at temperature differences which are typical of use. In these cases, it is preferable to use a temperature difference typical of use and then to determine an approximate relationship for a range of temperature differences. The dependence can be linear for a wide range of temperature differences.

A1.5.5 Some specimens, while being homogeneous, are anisotropic in that the thermal conductivity measured in a direction parallel to the surfaces is different to that measured in a direction normal to the surfaces. For such specimens, this can result in larger imbalance and edge loss errors. If the ratio between these two measurable values is lower than two, reporting according to this method is still possible if imbalance and edge heat loss errors are determined separately with anisotropic specimens mounted in the apparatus.

A1.5.6 *Thermal Conductivity or Thermal Resistivity of a Material:*

A1.5.6.1 In order to determine the thermal conductivity or thermal resistivity of a material, the criteria of A1.3.2 shall be fulfilled. In addition, adequate sampling must be performed to ensure that the material is homogeneous or homogeneous porous, and that the measurements are representative of the whole material product or system. The thickness of the specimens must be greater than that for which the thermal conductivity of the material product or system does not change by more than 2 % with further increase in thickness.

NOTE A1.1—Results obtained on specimens where thermal conductivity is still changing with specimen thickness are only applicable at that specific test thickness.

A1.5.7 *Dependence on Specimen Thickness:*

A1.5.7.1 Of the processes involved, only conduction produces a heat flow-rate that is directly proportional to the thickness of a specimen. The others result in a more complex relationship. The thinner and less dense the material, the more likely that the resistance depends on processes other than conduction. The result is a condition that does not satisfy the requirements of the definitions for thermal conductivity and thermal resistivity, both of which are intrinsic properties, since the transfer factor shows a dependence on the specimen thickness. For such materials, it may be desirable to determine the thermal resistance at conditions applicable to their use. There is believed to be a lower limiting thickness for all materials below which such a dependence occurs. Below this thickness, the specimen may have unique thermal transmission properties, but do not relate to the material. It remains, therefore, to establish this minimum thickness by measurements.

A1.5.7.2 Determination of minimum thickness above which thermal properties of the material may be defined.

A1.5.7.3 If the minimum thickness for which the thermal conductivity and resistivity can be defined is not known, it is necessary to estimate this thickness.

A1.5.7.4 In the absence of an established method, the procedure outlined below may be used to approximate the thickness and whether it occurs in the range of thickness in which a material is likely to be used.

A1.5.7.5 It is important to differentiate between added thermal resistance in measurements caused by the placement of the temperature sensors below the surfaces of the plates, added resistance caused by poor specimen surfaces, and added resistance caused by the coupling of the conduction and radiation modes of heat transfer in the specimens. All three can affect the measurements in the same way, and often the three may be additive.

A1.5.7.6 Select a sample uniform in density distribution, with the thickness L_5 , equal to the greatest thickness of the material to be characterized or equal to the maximum allowable thickness for the test apparatus.

A1.5.7.7 Cut five sets of specimens in approximately equal increments from the sample ranging in thickness from the smallest likely to be used in practice. The set of specimens shall be designated s_1 to s_5 according to their respective thickness L_1 to L_5 .

A1.5.7.8 For low density materials where heat is transferred by radiation and conduction mechanisms and where the absence of convection has been verified, the slope of a plot of thermal resistance versus thickness will very frequently diminish up to 1 to 2 cm and then will remain constant as the thickness increases. The reciprocal of this constant slope is the thermal conductivity to be assigned to high thickness specimens.

A1.5.7.9 Measure the thickness and thermal resistance of s_1 , s_3 , and s_5 at the same mean temperature and with the same temperature difference across the specimen. Plot the thermal resistance versus thickness. If these three values differ from a straight line relationship by less than $\pm 1\%$, the slope of the straight line shall be computed. If the three values differ by more than 1 %, then similar measurements shall be made on s_2 and s_4 to check if there is a thickness above which the thermal resistance does not differ from a straight line by more than 1 %.

A1.5.7.10 If this thickness exists, the slope of the straight line shall be determined to compute a thermal conductivity $\lambda_m = \Delta L / \Delta R$ defined as the ratio between the increments of thickness, ΔL , and increments of the thermal resistance, ΔR .

A1.5.7.11 The thickness at which this occurs will vary according to the densities, types and forms of different materials, products and systems for different mean temperatures.

A1.5.7.12 Thermal conductivity and thermal resistivity then characterizes the material, product or system for thicknesses above which the transfer factor differs by less than 2 % from λ_m .

A1.5.7.13 Allowance for experimental errors must be made in the interpretation of results. Least-square curve fitting of R versus L may also help. A larger number of specimens may be used where greater definition is required.

A1.5.7.14 Thickness dependence may be a function of temperature difference across the specimens. For the purposes of this test method, the above checks, if performed at typical operating temperature differences, shall be adequate to indicate the degree of thickness dependence.

A1.5.8 Method of Determining Dependence on Temperature Difference—If the temperature-difference dependence of the thermal properties is not known for a material, a minimum of three measurements shall be made. These are made with widely differing temperature differences. A second-order dependence can be revealed by these measurements. When a simple linear relationship is known to occur, only two measurements, that is, one extra, need be made. This establishes the linear dependence for that particular sample.

A1.5.9 Warping—Special care should be exercised with specimens with large coefficients of thermal expansion that warp excessively when subjected to a temperature gradient. The warping may damage the apparatus or may cause additional contact resistance that may lead to serious errors in the measurement. Specially designed apparatus may be necessary to measure such materials.

A1.6 Measurement Uncertainty—The uncertainty of the apparatus is based upon consideration of the random and systematic components of the following measurement uncertainties (32): uncertainty in heat flow, Q ; uncertainty in temperature difference, $T = (T_H - T_C)$; uncertainty in metered area, A ; and, uncertainty in specimen thickness, L .

A1.6.1 Other specimen characterization and test condition data may need to be reported. The precision and bias of these data are to be reported to the extent they have a direct bearing on the accuracy of the results. Prescribed precision and bias of the primary data are not mandated by this test method. However, it is required that the user assess and report the precision and bias of the data. The discussion below provides guidelines to assist the user in performing this uncertainty assessment. A variety of helpful performance checks are included in this discussion. In the following discussion both random and systematic errors are considered. The subscript s is used to denote systematic, and the subscript r is used for the random components.

A1.6.1.1 Systematic Error, s —Systematic error, s , is any component of error that remains fixed during the runs that constitute a successful test. To simplify the discussion, this does not include any components of error that are known both in magnitude and sign. Under such circumstances, the user should make appropriate corrections to the conductivity measurements and supply the justification for them. The user may check for the presence of unexpected errors by using a reference specimen or transfer standard available from appropriate sources. If errors are discovered, their source should be identified and removed. A guarded hot plate cannot be calibrated. The task of estimating the remaining systematic errors is based on judgment and experience, including an awareness of the results of interlaboratory comparisons. The implications of such estimates is often that they are the maximum possible systematic errors. In this event the total maximum systematic error is the sum of the errors. It is, however, more likely that these estimates are probabilistic in nature and do not, in fact, represent the worst possible case. The total probable systematic errors are summed in the same manner as random errors, that is, the square root of the sum of squares. In the following discussion the latter approach is taken. However, the user must

decide if the bias estimates are worst cases or probabilistic in nature, and sum them accordingly.

A1.6.1.2 Random Error, r —Random error, r , is that component of error that may vary both in sign or magnitude during the runs that constitute a successful test. For simplicity, it is assumed that the variations are normally distributed and conventional statistical techniques are applicable. An estimate of random error components can be obtained by repeat measurements of each variable.

A1.6.1.3 It is important to distinguish between random and systematic errors for the following reason. The results reported in the test method are mean values derived from more than a single run. The uncertainties reported generally apply to these mean values. The uncertainty of a mean value due to the random error component decreases approximately as $1/n$ where n is the number of repeat runs. In contrast to this, the uncertainty of the mean value due to the systematic error component does not decrease with repeat runs. Thus, it is recommended that the error components be treated separately. The total uncertainty is expressed by reporting both components separately.

A1.7 Error Components—In the following sections, the error components of each reported variable are discussed. The total random or systematic uncertainty for each variable is taken to be the square root of the sum of squares.

A1.7.1 Heat Flow, Q —The objective of the test method is to establish and measure uniaxial heat flow through the metered area of the specimen. Any deviation from this objective represents error in the reported heat flow. The following sources of error should be considered:

A1.7.2 Edge Heat Loss, sQ_{se} —Edge heat loss, sQ_{se} is a systematic error as the conditions surrounding the plate-specimen stack remain constant throughout the test procedure. Although tests have been reported that shed some light on the magnitude of this error, the results generally are not proven to the point where corrections based on these results are universally accepted (1,4,6,7,18-22). However, the results are considered sufficiently valid for the basis of defining the maximum specimen thickness. The optimum environmental temperature to minimize this error is a small fraction of T above the mean test temperature. To determine the sensitivity of this error to test conditions, the user should determine the heat flux as a function of secondary guard temperature. This dependence may change appreciably with specimen and apparatus characteristics and, therefore, should be done under typical test conditions.

A1.7.3 Gap Heat Loss—Gap heat loss is considered to be composed of both systematic, sQ_{gp} , and random, rQ_{gp} , components. The systematic component can be, in part, due to the fact that there may be a finite number of locations along the gap at which the imbalance is measured; reducing the temperature difference between a finite number of points on opposite sides of the gap to zero may not necessarily ensure that there is zero net flow of heat across the gap. Improper position of the sensors will lead to systematic error. Spurious emfs within the circuitry will result in a systematic imbalance. The random component is due to short-term control fluctuations. After estimating the probable imbalance across the gap in terms of

temperature (or sensor voltage) one needs to determine the effect of this imbalance on the measured heat flow through the metered area. This can be done by measuring the dependence of metered area power on intentionally introduced gap imbalance. A typical way of addressing this is to run three tests, one with the guard balanced and one each biased positive and negative. The results are plotted, λ versus gap balance, and the zero intercept is determined. The imbalance introduced should be large enough to yield an easily measured change in Q , but small enough to remain in the region where the dependence of Q upon imbalance is approximately linear.

A1.7.3.1 It has been found that (3,15,16) the gap heat loss, Q_{gp} is linearly dependent on temperature unbalance across the gap, T_g , that is, $Q_{gp} = BT_g$. The proportionality constant, B , is dependent on the wires crossing the gap (number, size, and type), gap geometry (width and cross-sectional shape), the gap fill material (gas, insulation), the emittance of the gap surfaces and the material in the vicinity of the gap between the hot and cold plates. A reasonable approximation of this heat flow can be calculated from this information. It is recommended that this be done to confirm the value measured by the procedure described in the previous paragraph.

A1.7.4 *Effect of Drift of the Metered Area Heater*—A quasi-heat loss exists due to the changing heat content of the metered area heater as its temperature changes. Typical plates have a relatively high heat capacity and even for small drift rates can produce significant errors in measured heat flow. If the drift is monotonic, the error is systematic, ${}_sQ_d$; if not, the error is exhibited as random error, ${}_rQ_d$. Normally, the experiment is conducted so that there is no observable drift. Under this circumstance, the possible drift is determined by the detectability or control limit, dT/dt , of the system. One can compute the magnitude of this error, Q_d in watts, from a knowledge of the maximum possible dT/dt and the specific heats and masses of the various components of the metered section of the plate as follows:

$$Q_d = dT/dt C_p M_i \quad (A1.1)$$

The specimen heat capacity also contributes to the drift error, but for low-density insulations the heat capacity of the specimen is small compared to the plate. This error also can be determined by measuring the dependence of drift rate on measured heater power. Comparison of the calculated and measured results is advised to increase confidence in the reported result.

A1.7.5 Power determination error, composed of both systematic, ${}_sQ_p$ and random, ${}_rQ_p$, components. With high quality instrumentation these errors can be reduced to an insignificant level. The manufacturers' specifications on bias and precision will normally suffice to define these errors.

A1.7.6 *Temperature and Temperature Difference*—Temperature error is composed of systematic, ${}_sT$, and random, ${}_rT$, components. In addition, these errors are further subdivided according to the source of the error:

A1.7.6.1 Calibration error, ${}_sT_c$, is entirely systematic as long as the same calibration is used. It is, however, not necessarily the same for each temperature sensor. In the case of thermocouples, calibration is frequently performed for each spool of wire, not for each piece of wire from that spool.

Therefore, systematic differences can occur as one progresses through the spool. The calibration is frequently represented by an equation which approximates the experimental calibration data taken at selected temperatures. If a digital read-out device is used that yields temperature directly, the calibration formulation is built into the device and the same basis for error exists.

A1.7.6.2 Instrumentation measurement error, T_m , occurs when the sensor output is measured. This error contains both systematic and random components. Each component should be estimated from equipment manufacturer's specifications and from estimated spurious circuit effects. In addition, temperature errors are introduced by long and short-term control fluctuations. A helpful procedure to assess the magnitude of these errors is as follows. Place the guarded metered area and primary guard(s) in thermal contact with the adjacent cold plates (insert high conductance plates in place of the specimens if the plates cannot be placed physically together). Adjust the cold plates to the desired temperature; control this temperature until steady-state is reached. The metered area heater should be off. Periodically read the isothermal surface temperatures to detect systematic differences and random variations over an extended time.

A1.7.6.3 Sensor positioning, a potentially significant source of error in temperature measurement can be caused by improper positioning of the sensor or the disturbance caused by the presence of or finite size of the sensor itself. It is intended that the average temperature of each specimen surface be measured. If the sensor is mounted in the plate surface, thermal contact resistance between the plate and specimen is a source of error. If the sensor is mounted in the specimen surface, sensor separation (specimen thickness) is a source of error. If the specimen is inhomogeneous across the metered area, surface temperature variations exist and the indicated temperature will depend on its location on the surface. If heat flows along the sensor leads from the external environment, the measured temperature will be in error because of the presence of the sensor. For a single test on a given specimen, this source of error, ${}_sT_p$, is systematic. A performance check that is helpful to determine the potential temperature error due to temperature nonuniformity is as follows: Assemble a multijunction thermocouple and place it between the specimen and plate in question. Establish steady-state at the desired test condition. Determine the variation in temperature across the plate from the multijunction thermocouple outputs.

A1.7.6.4 A helpful technique to estimate interface temperature errors is to mount sensors both within the plate and within the specimen surface. Then perform a test and calculate the difference between the two sets of data.

A1.7.6.5 Temperature difference error is also composed of systematic, ${}_sT$, and random components, ${}_rT$. Care must be exercised in estimating these components compared to the error components for temperature itself. The results can depend strongly on whether a differential measurement or two absolute measurements are performed. Because T is frequently small, large percentage errors can occur if care is not observed. For example, at a mean specimen temperature of 300 K, an error of 1 K in the mean temperature, that corresponds to an error of about 0.2 % in thermal resistance for typical insulations.

However, this same error of 1 K in measurement of a specimen temperature difference of 25 K corresponds to a 4 % error in both T and in the value of the thermal resistance, independent of the mean temperature. The ad hoc experiment described in 9.5.1.3 is recommended to provide estimates of these error components.

A1.7.7 Specimen thickness error, L , and meter area error, A , are both systematic errors. The specimen thickness error is determined by the ability to measure the plate spacing (including variations of this thickness over the metered area) or, in the case of rigid specimens, the specimen thickness and the changes due to thermal expansion. The effect of bowing or warping at operating temperatures should be given attention. At relatively large thicknesses (above 5 cm) this error can be maintained below 0.5 %. At small thicknesses (below 0.5 cm) this error may become a dominating factor in the overall accuracy. The meter area error is usually small except for the assumption about what proportion of the gap area to include. This error is difficult to estimate for very thin specimens or when a discontinuity in the specimen occurs at the gap. The specimen thickness error will contain a random component, L , due to assembly and disassembly.

A1.8 *Thermal Conductance or Thermal Resistance*—The relative uncertainty in thermal conductance, C , caused by either random errors or systematic errors of indeterminate sign, may be calculated from the following error propagation formula:

$$(\Delta C/C)^2 = (\Delta Q/Q)^2 + (\Delta T/T)^2 \quad (A1.2)$$

where Q/Q and T/T are the total relative uncertainties of heat flux and temperature difference, respectively. The same equation applies to thermal resistance. Included in the total relative uncertainties are those due to the measurement as well as those discussed in Practice C 1045. For example for fibrous glass insulation at 24°C mean temperature and a 40°F temperature difference across the specimen the following errors can be realized:

$$(\Delta C/C)^2 = (0.5)^2 + (0.25)^2 = 0.31 \quad (A1.3)$$

Therefore, the uncertainty in thermal conductance would be $\sqrt{0.31} = 0.56$ %.

A1.9 *Thermal Conductivity or Thermal Resistivity*—The relative uncertainty in thermal conductivity caused by either random or systematic errors may be calculated from the following error propagation formula:

$$\left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 = (\Delta Q/Q)^2 + (\Delta T/T)^2 + (\Delta A/A)^2 + (\Delta L/L)^2 \quad (A1.4)$$

where A/A and L/L are the total relative uncertainties of area and thickness, respectively. Again, the above total relative uncertainties include not only the measurement uncertainty, but also the effect of material variability and deviations from the definitions as discussed in Practice C 1045. In addition, it should be noted that the temperature to which each measured property is assigned also contains a measurement error that affects the uncertainty of the final result. The effect of this error increases as the temperature dependence of the measured property increases.

A1.9.1 For example for fibrous glass insulation at 24°C mean temperature and a 22°C temperature difference across the specimen the following errors can be realized.

$$\left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 = (0.5)^2 + (0.25)^2 + (0.01)^2 + (0.1)^2 = 0.32 \quad (A1.5)$$

Therefore, the uncertainty in thermal conductivity would be $\sqrt{0.32} = 0.57$ %.

A1.10 It is recommended that the user periodically confirm these calculated uncertainties by measuring specimens of established standard reference materials or calibrated transfer specimens. Comparison of the measurement results with the accepted values will reveal whether the performance of the guarded hot plate is of acceptable quality. The results of such comparative measurements are not to be used to obtain an apparatus "calibration" or "correction" factor. For further information on this see Refs (23-29).

REFERENCES

- (1) Bankvall, C. G., "Mechanisms of Heat Transfer in Permeable Insulation and Their Investigation in a Special Guarded Hot Plate," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 34-48.
- (2) Brendang, E., and Frivik, P. E., "New Development in Design of Equipment for Measuring Thermal Conductivity and Heat Flow," *ASTM STP 544*, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 147-166.
- (3) Smith, D. R., Hust, J. G., and Van Poolen, L. J., "A Guarded-Hot-Plate Apparatus for Measuring Effective Thermal Conductivity of Insulations Between 80 K and 360 K," *NBSIR 81-1657*, 1982, 49 pp.
- (4) Pratt, A. W., Chapter 6: "Heat Transmission in Low Conductivity Materials," in *Thermal Conductivity*, Vol 1, R. P. Tye, Ed., Academic Press, 1969, pp. 301-405.
- (5) De Ponte, F., and Di Filippo, P., "Design Criteria for Guarded Hot Plate Apparatus," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 97-117.
- (6) Woodside, W., and Wilson, A. G., "Unbalance Errors in Guarded Hot Plate Measurements," *Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulations, ASTM STP 217*, 1956, pp. 32-48.
- (7) Woodside, W., "Analysis of Errors Due to Edge Heat Loss in Guarded Hot Plates," *Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulations, ASTM STP 217*, 1957, pp. 49-64.
- (8) Woodside, W., "Deviations from One-Dimensional Heat Flow in Guarded Hot Plate Measurements," *Review of Scientific Instruments*, Vol 28, 1957, pp. 1033-1037.
- (9) Hust, J. G., "Thermal Anchoring of Wires in Cryogenic Apparatus," *Review of Scientific Instruments*, Vol 41, No. 5, May 1970, pp. 622-624.
- (10) ASTM Subcommittee E20.04, *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, ASTM STP 470B*, 1981.
- (11) Sparks, L. L., Powell, R. L., and Hall, W. J., *Cryogenic Thermocouple Tables, NBS Report 9712*, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, 1968.
- (12) Bertasi, M., Bigolaro, G., and De Ponte, F., "Fibrous Insulating Materials as Standard Reference Materials at Low Temperatures,"

- Thermal Transmission Measurements of Insulation, ASTM STP 660, R. P. Tye, Ed., 1978, pp. 30-49.*
- (13) Shirliffe, C. J., "Establishing Steady-State Thermal Conditions in Flat Slab Specimens," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 13-33.*
 - (14) Bomberg, M. and Solvason, K. R., "Precision and Accuracy of Guarded Hot Plate Method," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 393-410.*
 - (15) Siu, M. C. I., "Comparison of Results of Measurements Made on a Line-Heat-Source and a Distributed Heat Source Guarded-Hot-Plate Apparatus," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 413-418.*
 - (16) Siu, M. C. I., and Bulik, C., "National Bureau of Standards Line-Heat-Source Guarded-Hot-Plate Apparatus," *Review of Scientific Instruments, Vol 52(11), 1981, pp. 1709-1716.*
 - (17) Horlick, J., "National Voluntary Laboratory Accreditation Program, Proficiency Testing for Thermal Insulation Materials Laboratory Accreditation Program," *NBSIR 84-2890, 1984.*
 - (18) Donaldson, I. G., "A Theory for the Square Guarded Hot Plate-A Solution of the Heat Conduction Equation for a Two Layer System," *Quarterly of Applied Mathematics, Vol XIX, 1961, pp. 205-219.*
 - (19) Donaldson, I. G., "Computer Errors for a Square Guarded Hot Plate for the Measurement of Thermal Conductivities of Insulating Materials," *British Journal of Applied Physics, Vol 13, 1962, pp. 598-602.*
 - (20) Pratt, A. W., "Analysis of Error Due to Edge Heat Loss in Measuring Thermal Conductivity by the Hot Plate Method," *Journal of Scientific Instruments, Vol 39, 1962, pp. 63-68.*
 - (21) Somers, E. V., and Cybers, J. A., "Analysis of Errors in Measuring Thermal Conductivity of Insulating Materials," *Review of Scientific Instruments, Vol 22, 1951, pp. 583-586.*
 - (22) Troussart, L. R., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Guarded Hot Plate Apparatus and its Computer Implementation," *Journal of Thermal Insulation, Vol 4, 1981, pp. 225-254.*
 - (23) Pelanne, C. M., "The Development of Low Density Glass-Fiber Insulation as Thermal Transmission Reference Standards," *Seventeenth International Thermal Conductivity Conference, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 763-776.*
 - (24) Rennex, B. G., Jones, R. R., and Ober, D. G., "Development of Calibrated Transfer Specimens of Thick, Low-Density Insulations," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 419-426.*
 - (25) Shirliffe, C. J., "Effect of Thickness on the Thermal Properties of Thick Specimens of Low-Density Thermal Insulation," *Thermal Insulation Performance, ASTM STP 718, D. L. McElroy and R. P. Tye, Eds., 1980, pp. 36-50.*
 - (26) Siu, M. C. I., "Fibrous Glass Board as Standard Reference Material for Thermal Resistance Measurement Systems," *Thermal Insulation Performance, ASTM STP 718, D. L. McElroy and R. P. Tye, Eds., 1980, pp. 343-360.*
 - (27) Smith, D. R., and Hust, J. G., "Effective Thermal Conductivity of Glass-Fiber Board and Blanket Standard Reference Materials," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 483-496.*
 - (28) Smith, D. R., and Hust, J. G., "Measurement of Effective Thermal Conductivity of a Glass Fiberboard Standard Reference Material," *Cryogenics, Vol 21, No. 7, July 1981, pp. 408-410.*
 - (29) Smith, D. R., Hust, J. G., and Van Poolen, L. J., "Measurement of Effective Thermal Conductivity of Glass Fibreblanket Standard Reference Material," *Cryogenics, Vol 21, No. 8, August 1981, pp. 460-462.*
 - (30) Hust, J. G., and Smith, D. R., "Round-Robin Measurements of the Apparent Thermal Conductivity of Two Refractory Insulation Materials, Using High Temperature Guarded-Hot-Plate Apparatus," *NBSIR 88-3087, 28 pp., U.S. National Institute of Standards and Technology, April 1988.*
 - (31) Peavy, B. A., and Kennex, B. G., "Circular and Square Edge Effect Study for Guarded-Hot-Plate and Heat-Flow-Meter Apparatuses," *Journal of Thermal Insulation, 9, 1986, pp. 254-300.*
 - (32) International Organization for Standardization (ISO), *Guide to the Expression of Uncertainty In Measurement, ISBN 92-67-10188-9, 1993, First Edition.*
 - (33) Bode, K.-H., "Thermal Conductivity Measurements with the Plate Apparatus: Influence of the Guard Ring Width on the Accuracy of Measurements," *Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methodology, ASTM STP 879, C. J. Shirliffe, and R. P. Tye, Eds., 1985, pp. 29-48.*
 - (34) ASTM, *Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis, Manual 7, 6th Edition, 1991, Available from ASTM Headquarters, Request PCN:28-0070899-34.*
 - (35) Eisenhart, C., "Realistic Evaluation of the Precision and Accuracy of National Calibration Systems," *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol 67C, No. 2, April-June 1963, pp. 161-187.*
 - (36) Pham, Q. T., and Smith, C. G., "Thermal Imbalance Errors and Effective Area in Guarded Hot Plates," *Review of Scientific Instruments, Vol 57(1), January 1986, pp. 99-105.*
 - (37) Orr, H. W., "A Study of the Effects of Edge Insulation and Ambient Temperature on Errors in Guarded-Hot-Plate Measurements," *Proceedings of the 7th Thermal Conductivity Conference, D. R. Flynn, and B. A. Peavy, Eds., 1968, pp. 521-526.*
 - (38) Robinson, H. E., and Watson, T. W., "Interlaboratory Comparison of Thermal Conductivity Determinations with Guarded-Hot-Plates," *Symposium on Thermal Insulating Materials, ASTM STP 119, Philadelphia, 1951, pp. 36-44.*
 - (39) Horlick, J., and Berger, H. W., "NVLAP and the Thermal Insulation Proficiency Testing Program," *Journal of Thermal Insulation, Vol 8, April 1985, pp. 278-297.*
 - (40) Ku, H. H., "Notes on the Use of Propagation Error Formulas," *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol 70C, No. 4, October-December 1966, pp. 263-273.*
 - (41) Hust, J. G., and Pelanne, C. M., "Round Robins on the Apparent Thermal Conductivity of Low Density Glass Fiber Insulations Using Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Apparatus," *NBSIR 85-3026, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, 1985.*
 - (42) Pelanne, C. M., "Experiments on the Separation of Heat Transfer Mechanisms in Low-Density Fibrous Insulation," *8th Conference on Thermal Conductivity, Plenum Press, 1969, pp. 897-911.*

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE SUELO RADIANTE HIDRÁULICO APLICADO A CRIADERO PORCINO DEL BARRIO “LA DELICIA” DEL CANTÓN SALCEDO

Segura, Edison¹

Universidad técnica de Ambato, Facultad de ingeniería Civil y Mecánica Ambato, Ecuador,
email:edrmetal2009@hotmail.com

Resumen: Este sistema de calefacción porcina de suelo radiante hidráulico, está diseñado con materiales que se los puede adquirir fácilmente en el país y con características bioecológicas, centrándose al estudio de las variables de funcionamiento como lo son la conductividad térmica en los materiales y el aislamiento de calor a fin de promover confort térmico en los organismos de estudio. Se determinó las propiedades físicas de los materiales para maximizar el funcionamiento del sistema de suelo radiante hidráulico. Por medio de ensayos de placa caliente se determinó la conductividad térmica de diferentes aislantes, seleccionando el que mejor se adapte al funcionamiento del sistema. Para la construcción se seleccionó una tubería de polietileno y un aislamiento de aglomerado de cascarilla de arroz con resina de polivinilo.

Palabras clave: Suelo radiante, calefacción, confort térmico, conductividad térmica, cacarilla de arroz, aislante, serpentín.

Abstract: This system swine underfloor heating hydraulics, is designed with materials that they can be easily purchased in the country and bio-ecological characteristics, focusing the study of operating variables such as thermal conductivity in materials and heat insulation to promote thermal comfort study agencies. The physical properties of the materials was determined to maximize the performance of hydraulic underfloor heating system. Through hot plate test the thermal conductivity of different insulation was determined by selecting the best suited to the operation of the system. For construction and polyethylene pipe insulation agglomerated rice hull polyvinyl resin was selected.

Keywords: Underfloor heating, thermal comfort, thermal conductivity, cacarilla rice, insulation, coil.

¹Este artículo fue recibido el 30 de Marzo de 2016. Bajo el tema del proyecto de titulación “Diseño y construcción de un sistema de suelo radiante hidráulico aplicado a criadero porcino del barrio “La Delicia del cantón Salcedo”

I. Introducción

Según [1] este sistema es considerado como uno de los métodos de mayor eficacia al compararlos con el resto de invenciones determinadas a cumplir el mismo proceso, los denominados sistemas convencionales tienden a calentar el ambiente desde la parte superior del área hasta el suelo, lo cual implica una mayor concentración de calor en el techo mientras que en la superficie inferior es mínimo. Y debido a que los animales pasan todo el tiempo en el piso existe la necesidad de elevar las temperaturas en la zona baja para una óptima calefacción. De ahí la relevancia por obtener parámetros de diseño y construcción en sistemas de calefacción que distribuyan la temperatura de una manera uniforme dando a conocer cómo influyen en las características ambientales de naves industriales, viviendas, y alojamientos agroindustriales.

La calefacción por suelo radiante beneficia en gran medida la cría de ganado porcino, gracias a la distribución uniforme de calor en el piso y posteriormente en el ambiente, modifica positivamente las condiciones externas y circunstancias que afectan la salud y el bienestar

tanto reproductivo como de crecimiento del animal, mientras el animal se encuentre en un ambiente de confort el desempeño de la granja mejora notablemente disminuyendo la cantidad de alimento consumido, las muertes en el nacimiento y el tiempo de salida al mercado, este sistema de calefacción por suelo radiante es energéticamente eficiente debido a que necesita bajas temperaturas de entrada entre 40-45 °C por lo que ahorra energía

Debido a estas características el sistema de suelo radiante obtiene un ahorro de energía que oscila entre 20-30% respecto a los sistemas tradicionales. [2]

II. Metodología

Se seleccionó el tipo de serpentín para el circuito hidráulico dato que ayudó a determinar el material de la tubería la longitud necesaria y el diámetro y el paso de la misma.

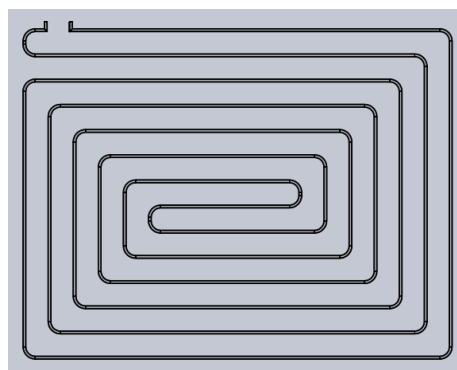


Figura 1 Serpentín

Se estableció los parámetros de funcionamiento del sistema de calefacción de suelo radiante tales como temperatura del agua, salto térmico, conductividad térmica de los materiales, temperatura óptima de calefacción.

Datos de diseño	
T. piso radiante	32 °C
T. del agua	45 °C
Salto Térmico	10 °C
Longitud de tubería	40 m
Diámetro	0.013 m
Piso de cemento	1,4 W/m°C
	Espesor= 0,05 m

Tabla 1. Datos de diseño

Posteriormente y con ayuda del método de placa caliente se determinaron los coeficientes de conductividad térmica de cada una de las mezclas utilizadas como alternativa para la capa de aislamiento térmico.

RESULTADOS DE LOS AISLANTES	
Aislante	Conductividad térmica (W/ m ²)
Cascarilla de arroz	0,582
Cascarilla de arroz con espuma de poliestireno	0,564
Cascarilla de arroz aglomerada con resina de vinil acrílico	0,460

Tabla 2. Conductividades de diferentes aislantes

Una vez obtenidos los datos necesarios mediante el diseño se procede a la construcción del sistema de calefacción, tomando en cuenta los parámetros antes mencionados y las sugerencias de las fuentes bibliográficas consultadas.



Figura 2 Serpentin en espiral



Figura 3 Sistema de impulsión y calentamiento



Figura 4 piso radiante terminado

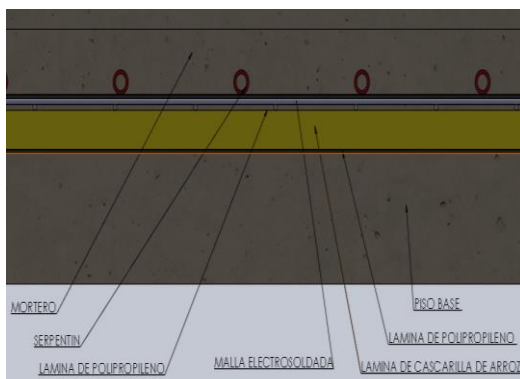


Figura 5 partes de piso radiante instalado

Una vez que el mortero esté seco se da inicio al sistema de calefacción

midiendo las temperaturas del piso conforme avanza el tiempo.

III. Resultados

Mediante las pruebas de funcionamiento del sistema de calefacción se obtuvo los datos de las temperaturas anclazadas en el piso radiante con intervalos de tiempo de 30 minutos.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	24
15	25
30	26
45	26
60	29
75	30
90	31
105	32
120	32
135	33
150	34
165	34
180	34
195	35
210	35
225	35
240	35

Tabla 3. Temperaturas obtenidas en suelo radiante

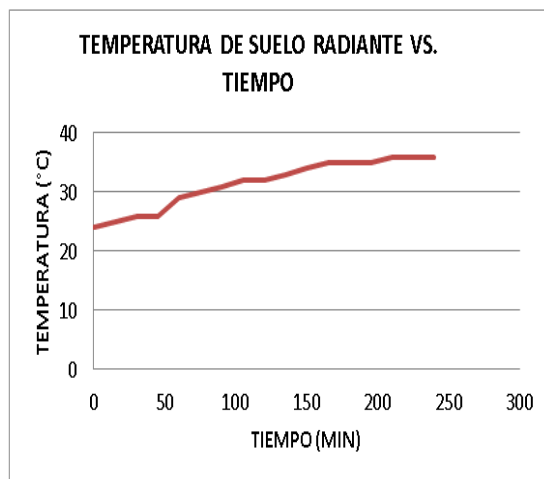


Figura 6 Gráfico temperatura vs. Tiempo

T. entrada (°C)	T. salida (°C)	Salto térmico (°C)
45	42	3
46	42	4
47	45	2
49	46	3
49	48	1
50	48	2
51	48	3
53	50	3
55	53	2
55	53	2
55	53	2
Promedio		2,5

Tabla 4. Salto térmico en serpentín

IV. Conclusiones

- Los parámetros de funcionamiento del suelo

radiante fueron determinados en base a la bibliografía existente del tema de investigación, y llegando a determinar las temperaturas de funcionamiento el salto térmico y el dimensionamiento del circuito de calefacción.

- Se obtuvo los factores termodinámicos necesarios para el sistema de suelo radiante, eligiendo como material aislante un aglomerado de cascarilla de arroz con resina de polivinilo con una conductividad térmica de $0,46 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, material ecológico y que se puede buscar varias aplicaciones.
- La tubería seleccionada y recomendada por los fabricantes de suelo radiante es una tubería de polietileno, material que cuenta con las características necesarias para la calefacción de suelo radiante siendo un material que soporta temperaturas hasta de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ y no generará problemas debido a que la temperatura con la que se va a trabajar es de $45 \text{ }^\circ\text{C}$.
- El sistema de suelo radiante implementado para la calefacción porcina cuenta con los requerimientos necesarios

para la subsistencia y el confort térmico de los organismos de estudio, puesto que las temperaturas obtenidas en la práctica están en un rango de 32-35 °C temperaturas recomendadas en los manuales de crianza.

- El salto térmico obtenido en el sistema difiere con los valores de cálculo del diseño, el salto térmico calculado es de 10 °C y el obtenido es de 2.5 °C, este salto térmico se da debido a que el circuito no cuenta de mucha longitud, siendo un valor muy importante ya que nos da a conocer que no se necesita de mucha energía para recalentar el agua de circulación generando un ahorro significativo para el funcionamiento.
- El sistema de suelo radiante propuesto satisface todos los cálculos realizados en el diseño, debido a que cuenta con una eficiencia del 80%.

V. Bibliografía

- [1] EBA, «Estructuras Bioclimáticas Avanzadas S.L.,» 06 MAYO 2015. [En línea]. Available: <http://ebasl.es/suelo-radiante/>.
- [2] C. Ecológicas, «Casas Ecológicas,» 11 Septiembre 2011. [En línea]. Available: <http://icasasecológicas.com/calefaccion-suelo-radiante/>. [Último acceso: 17 12 2015].
- [3] D. Olivera, «“Diseño energético de un suelo radiante para una sala de 12 m² ubicada a 4 000 msm en Langui-Cuzco”,» Tesis para optar por el Título de Ingeniero Mecánico, 2011.
- [4] E. Rodríguez, «Diseño, Construcción e Instalación de un sistema de calefacción con energía solar,» Tesis para optar por el Título de Ingeniero Mecánico , 2012.
- [5] R. Villaruel, «Calefacción por piso radiante para salón de eventos de centro de ferias parque Saval,» Tesis para optar por el Título de Ingeniero Constructor, 2010.