



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE ARCILLA
PROVENIENTE DE LA UNIÓN, ANT. ANTE EL
CALENTAMIENTO POR RADIACIÓN INFRARROJA**

Autor:

Alejandro Restrepo Román

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica

Medellín, Colombia

2020



ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE ARCILLA PROVENIENTE DE LA UNIÓN, ANT. ANTE EL CALENTAMIENTO POR RADIACIÓN INFRARROJA



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

1 8 0 3

Alejandro Restrepo Román

Estudiante de Ingeniería Mecánica

Trabajo de grado presentado para optar el título de Ingeniero Mecánico

Asesor:

M. SC. Andrés Adolfo Amell Arrieta

Grupo de investigación:



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN-COLOMBIA

2020

AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero agradecer a mi familia como tal, ellos siempre me han brindado apoyo en la carrera y por tal motivo, he podido llegar y obtener siempre de forma positiva los conocimientos que me han otorgado los diferentes profesores que he tenido a lo largo de mi vida académica. También, quisiera dar gracias a Dios por estar junto a mí en toda la vida dándome ese impulso, sabiduría e inteligencia para lograr las metas y la comprensión de cada tema de forma efectiva.

Agradecimientos especiales también a todo el cuerpo de profesores del pregrado de ingeniería mecánica de la universidad de Antioquia por haber compartido sus vastos conocimientos conmigo, pero en especial al profesor y coordinador del grupo GASURE, Andrés Amell por permitirme realizar dicho trabajo en el grupo en un tema que realmente es de interés personal y que ha sido un gran aporte al conocimiento propio abarcando casi que todas las líneas que brinda el pregrado. Cabe anexar que a los compañeros del grupo de investigación también va dirigido mi agradecimiento, pues en ellos he visto una familia que me ha ayudado y apoyado con el entendimiento de diferentes temáticas del presente trabajo, además del procedimiento experimental junto al montaje. También, añado a los gestores y promotores del proyecto “Ajuste, escalado y evaluación en condiciones de procesos productivos industriales de sistemas de combustión avanzados de alta eficiencia energética y bajas emisiones” dado que esta fue la razón por la que se hizo el presente estudio, entre estos promotores está la empresa SUMICOL SAS y la alianza para la sostenibilidad energética para Colombia, SENECA, que buscan diversificar las fuentes de energía del país.

Expreso gratitud enteramente al personal del laboratorio de operaciones unitarias perteneciente al departamento de ingeniería química por permitirme realizar los diferentes experimentos en su túnel de secado además de posibilitarme efectuar modificaciones en este para ejecutar las pruebas comparativas. Especialmente, adjunto también mi gratitud al ingeniero Ricardo, coordinador del laboratorio por guiarme y acompañarme con el montaje de los experimentos.

Finalmente, agradezco en general a la universidad de Antioquia por ser un espacio que fomenta la educación, investigación y el pensamiento crítico en cada estudiante, incluyéndome, siendo un lugar acogedor en el cual se establecen amistades en pro del conocimiento, algo que debe ser a nivel departamental en cada institución de educación superior.

CONTENIDO

1. Resumen	1
2. Introducción.....	2
3. Objetivos	4
3.1 Objetivo general	4
3.2 Objetivos específicos.....	4
4. Marco teórico.....	5
4.1 Arcillas	5
4.1.1 Definición	5
4.1.2 Clasificación.....	5
4.1.3 Propiedades	6
4.2 Transferencia de calor	8
4.2.1 Transferencia de calor por convección	9
4.2.2 Transferencia de calor por radiación	12
4.3 Teoría del secado	19
4.3.1 Secado.....	19
4.3.2 Balances de energía en el secado.....	23
4.4 Hornos	23
4.4.1 Definición	23
4.4.2 Clasificación.....	24
4.4.3 Hornos destinados para el proceso de secado	26
4.4.4 Principales especificaciones técnicas de los secadores rotativos	28
4.4.5 Aplicaciones en procesos de secado industriales	29
4.5 Modelos numéricos para la simulación de fenómenos radiantes	30
4.5.1 Simplificación de los modelos para propiedades radiantes.....	33
5. Estudio del comportamiento de arcilla ante el calentamiento por radiación infrarroja	33
5.1 Acerca de la arcilla.....	33
5.2 Equipos de medición	35
5.2.1 Radiómetro.....	35
5.2.2 Túnel de secado	37

5.2.3 Sensor de temperatura.....	38
5.2.4 Lámparas infrarrojas.....	39
5.2.5 Anemómetro.....	39
5.2.6 Celda de carga.....	40
5.2.7 Cámara termográfica.....	40
5.3 Montaje.....	41
5.3.1 Rediseño.....	42
5.3.2 Montaje híbrido.....	46
5.4 Normatividad para el tratamiento de muestras.....	46
5.5 Experimentos.....	47
5.5.1 Medición experimental de la emisividad.....	47
5.5.2 Cálculo de la absorptividad del material.....	49
5.5.3 Comparación de la influencia de la radiación infrarroja en el secado.....	52
5.6 Resultados y análisis de datos.....	53
5.6.1 Emisividad.....	53
5.6.2 Curvas de secado.....	56
5.6.3 Absortividad.....	61
6 Conclusiones.....	65
7 Trabajos futuros.....	67
8 Bibliografía.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los materiales arcillosos (Díaz & Torrecillas, 2002).	5
Figura 2. Descripción del proceso de meteorización [19].	6
Figura 3. Relación de las propiedades del suelo según el tamaño de grano [28].	8
Figura 4. a) Flujo externo, b) Flujo interno [37].	10
Figura 5. Régimen de flujo [34]	11
Figura 6. Espectro electromagnético [34]	13
Figura 7. Balance de energía del sólido transparente [34]	14
Figura 8. Ángulo sólido [34]	14
Figura 9. Radiosidad [34].	15
Figura 10. Variación de la emisividad con la temperatura en metales [34]	16
Figura 11. Variación de la emisividad en función de la longitud de onda [34].	16
Figura 12. Reflexión difusa y especular [34]	17
Figura 13. Intercambio de calor por radiación entre superficies [34]	18
Figura 14. Configuración geométrica para hallar el factor de forma [34].	18
Figura 15. Contenido de humedad en el equilibrio típico de sólidos insolubles y tipos de humedad [44]	19
Figura 16. Humedad de un sólido sometido a secado en el tiempo [44].	20
Figura 17. Rapidez de secado vs humedad en el sólido [44].	21
Figura 18. Esquema de un secador flash [54].	26
Figura 19. Esquema de secador de lecho fluidizado [55].	27
Figura 20. Esquema de secador rotativo [56]	27
Figura 21. Arreglo de tubos en el secado por vapor [57]	28
Figura 22. Modelo conceptual del secador de tubos por vapor [57].	28
Figura 23. Modelado de transferencia de calor radiativo	30
Figura 24. Indicador H-203	36
Figura 25. Funcionamiento del radiómetro [89].	36
Figura 26. STURTEVANT SILENTVANE FAN STYLE W50140 [92].	37
Figura 27. Esquema de un túnel de secado [1]	37
Figura 28. Comportamiento de los sensores de temperatura [93].	38
Figura 29. Indicador CHY 806A MULTILOGGER THERMOMETER	38
Figura 30. Sensor de temperatura y humedad HX94AC	39
Figura 31. Lámpara infrarroja	39
Figura 32. Anemómetro CHY361 [98]	40
Figura 33. Celda de carga VECTOR.	40
Figura 34. Cámara termográfica TESTO 885	41
Figura 35. Montaje del soporte convectivo	41
Figura 36. Rediseño del soporte.	42
Figura 37. Perfil del soporte	42
Figura 38. Condiciones de operación de las barras.	43
Figura 39. Deformaciones resultantes de las barras en U	43
Figura 40. Deformaciones en la barra alargada	44
Figura 41. Reacción más crítica del soporte.	44
Figura 42. Condiciones de operación del tornillo.	44
Figura 43. Deformaciones en el tornillo.	45
Figura 44. Soporte del sistema radiativo	45
Figura 45. Factor de seguridad del soporte base.	45
Figura 46. Rediseño superior del soporte.	46
Figura 47. A) Túnel de secado por convección, B) Túnel de secado híbrido.	46

Figura 48. Experimento de medición de emisividad [102].	48
Figura 49. Experimento 2 de medición de emisividad [103]	48
Figura 50. Perfil para simular	50
Figura 51. Mallado del sistema	50
Figura 52. Comportamiento de la radiación	51
Figura 53. Fracción de la radiación incidente en el sólido	51
Figura 54. Calentamiento del aire del túnel [49]	52
Figura 55. Montaje de calentamiento por cámara termográfica	53
Figura 56. Distribución de temperaturas en el sector evaluado	54
Figura 57. Emisividad vs Temperatura [°C]	54
Figura 58. Curvas de secado de la arcilla a convección e híbrida	56
Figura 59. Variación de la masa en el tiempo al secar por radiación	58
Figura 60. Muestra de arcilla al secarse por radiación pura	58
Figura 61. Humedad en el tiempo al secar por radiación	59
Figura 62. Esquema del nuevo montaje de radiación pura	59
Figura 63. Curvas de secado por convección e híbrida	60
Figura 64. Flux de masa en función de la velocidad	61
Figura 65. Termografía de la arcilla al secarse	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las partículas del suelo según su diámetro [27]	7
Tabla 2. Correlación de flujo cruzado en un cilindro [34]	12
Tabla 3. Aplicaciones industriales de hornos de secado [60].....	30
Tabla 4. Composición química de la arcilla	34
Tabla 5. Propiedades radiantes del caolín	34
Tabla 6. Propiedades físicas, químicas y ópticas de la arcilla [82].....	35
Tabla 7. Características de los aceros utilizados en el montaje	42
Tabla 8. Requerimientos para el experimento acorde la norma ASTM-D2216	47
Tabla 9. Experimentos en el túnel de secado.....	52
Tabla 10. Flux de masa y humedad de salida de los experimentos	57
Tabla 11. Masa evaporada en la tasa de secado constante	62
Tabla 12. Masa evaporada en la tasa de secado decreciente	63
Tabla 13. Coeficientes del calor específico de los componentes representativos de la arcilla.....	63

1. Resumen

El calentamiento por medio de radiación infrarroja se muestra como una alternativa viable para el sector industrial, no sólo por poder brindar mejor calidad en los productos resultantes de una empresa (Por no decir la inocuidad debido a la interacción indirecta con el producto) o incrementar la eficiencia de un sistema térmico [1]; sino, por la viabilidad que involucra el ingreso de nuevos recursos energéticos como fósiles o de origen renovable, utilizando energías más eficientes que reduzcan costos de producción, más control de las variables de un proceso, alta uniformidad en el calentamiento, bajas emisiones. Por tal motivo, los procesos que involucran radiación infrarroja tales como el secado son un paso esencial para la futura industria tanto en el campo de alimentos, minerales, textiles, entre otros [2], [3].

En el presente trabajo se desarrolla la caracterización de la arcilla Unión Tipo I ante el calentamiento por radiación infrarroja. Donde se encuentra que la arcilla pertenece al grupo caolín debido a una prueba XRF realizada en las instalaciones de la universidad de Antioquia. Además, se implementa una metodología para determinar la emisividad del material, con la cual se analiza que aumenta con la temperatura obteniendo un valor máximo de 0.6, con tendencias constantes en 0.5 entre 40 °C y 80 °C y una emisividad promedio de 0.472; por otra parte, se realiza un comparativo de secado del material por convección pura, convección-radiación (híbrido) y radiación bajo las mismas condiciones del flujo, donde se comprueba que el montaje híbrido en las mejores condiciones de operación ($T=40$ °C, $V=2$ m/s) requiere sólo el 9 % del tiempo que consume el secado convectivo, también se obtiene que el material no seca en el proceso de secado por radiación pura manteniendo la masa inicial constante y a su vez elevando la humedad relativa del espacio donde se realizan las pruebas. Además, se generan curvas de secado variando la temperatura y velocidad del aire para determinar la influencia de estas variables en el secado híbrido y se halla que a mayor velocidad y menor temperatura la tasa de secado es mayor, siendo la primer variable más influyente que la segunda; finalmente con las curvas de secado se determina la absorptividad del material de forma analítica en base a la masa de agua evaporada del material, obteniéndose un valor de 0.453 para la tasa de secado constante y 0.1385 para la tasa de secado decreciente. Paralelamente se desarrolla una simulación 2D del montaje para determinar el factor de forma del arreglo de lámparas con respecto a la ubicación del material.

2. Introducción

El Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Eficiente y Racional de la Energía -GASURE- es un grupo de investigación enfocado en el desarrollo tecnológico, la formación de recursos humanos y la divulgación en el uso energético de combustibles renovables y no renovables, así como en el uso racional de la energía. Gracias al trabajo analítico, el grupo proporciona grandes aportes enfocados a la reducción de consumos de combustibles, a la optimización de sistemas industriales de combustión y de calentamiento, a la capacitación del personal, al aumento de la competitividad de los sectores productivos y a las mejoras en salud ocupacional [4].

GASURE cuenta con diferentes oficinas ubicadas en ciudad universitaria; además, cuenta con un par de laboratorios. Uno de ellos se ubica en la Universidad de Antioquia con dirección Calle 67 No. 53 - 108, Facultad de Ingeniería 19-000; el otro se ubica cerca a la sede de investigación universitaria (SIU) con dirección Cl. 62 #52-59, Medellín, Antioquia. En los cuales se desarrollan los diferentes experimentos que han conllevado a diferentes patentes, artículos y desarrollos tecnológicos en diferentes empresas a nivel nacional (ver: <http://gasure.udea.edu.co/es/desarrollos>).

En la actualidad, el grupo se encuentra en el desarrollo de investigaciones de diferentes temáticas en cuanto al aprovechamiento de la energía térmica, este énfasis se debe a que de 1 TJ (TERAJOULE) de energía que se consume en el país, sólo se aprovecha el 48 % de este y lo demás es desechado al entorno acorde a la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) en el año 2015, lo cual representa costos de energía desperdiciada aproximadamente de 4700 millones de dólares al año [5]. Cabe añadir que en el sector industrial del país, por una unidad de energía eléctrica se utilizan 4 unidades de energía térmica según estudios realizados por la Red de Investigación e Innovación en Combustión Avanzada de Uso Industrial – Incombustion [6], ejecutados para la UPME y Colciencias en el periodo 2013-2017; por lo que dicha situación se convierte en un tema fundamental de estudio.

Acorde al comité del sector cerámico colombiano ANDI, compuesto por las empresas Corona, Alfa, cerámica Italia, Eurocerámica y cerámica San Lorenzo [7]. La extracción y procesamiento de la materia prima requiere de alta demanda energética por el alto uso de esta misma, alcanzando así consumos de energía de 190.114.476 kWh en el año 2015, lo que se traduce a 1.2 % la energía consumida del país para ese mismo año y a su vez, un incremento del 18.4 % respecto al año 2010; además de generar un impacto en el país en diferentes ámbitos, tales como contribuir con el 17.2 % de la tasa de empleo para el año 2015 y consumir 536.661 m³ de agua (10.3 % el consumo del país) para este mismo.

Como motivo de optimizar la industria de secado de arcillas desde el punto de vista energético y aportar nuevas alternativas de transferencia de calor, el grupo GASURE junto a la empresa SUMICOL (Planta perteneciente a Corona) busca nuevas opciones de combustión avanzada, sostenible y con transferencia de calor eficiente por medio del diseño de un horno de secado que actúe en régimen de combustión sin llama para aprovechar la transferencia de calor que se da por radiación infrarroja, por ello se debe realizar la

caracterización de dicha arcilla con las propiedades tanto físicas, químicas y térmicas; además de implementar un banco de ensayo a escala que sirva para realizar las debidas pruebas y tabular los resultados obtenidos. El diseño radiativo se debe a que el estado del arte actualmente plantea que el principio de calentamiento de los hornos utilizados para secar materiales es la transferencia de calor por convección [8]. Empleando gases calientes a temperaturas máximo de 80 °C requiriendo largos tiempos de secado y rangos de energía que disminuyen la eficiencia del proceso [3].

Por lo anterior, es necesario definir parámetros en los procesos de secado según las especificaciones del producto, garantizando los valores de sus propiedades y permitiendo estandarizar las pruebas de la influencia de la radiación en la arcilla. Teniendo en cuenta que, estos nuevos desarrollos tecnológicos disminuyen los tiempos de secado pero pueden afectar el material y sus propiedades superficiales al ocasionar formación de grietas [3].

Por ende, en el presente trabajo se plantea la caracterización de la arcilla por medio del diseño de un prototipo que logre la transferencia de calor por radiación requerida y la toma de datos experimentales de la curva de secado del material. Para la ejecución de dicho diseño se efectúa la investigación previa correspondiente al estado del arte, investigaciones referentes al proceso y a los factores relevantes en el proceso de calentamiento por radiación infrarroja, teniendo en cuenta que actualmente el calentamiento se realiza mayormente por convección de los gases de combustión más aire caliente produciendo alta producción de CO₂, CO, N₂, NO_x, SO_x, entre otros elementos [9]; como también mayor volumen de los hornos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

“Realizar el estudio del comportamiento del secado de arcilla proveniente del municipio de la Unión, Ant. ante el calentamiento por radiación infrarroja”.

3.2 Objetivos específicos

1. Identificar las propiedades físicas, químicas y térmicas de la arcilla relacionadas con el fenómeno de transferencia de calor por radiación.
2. Reconocer los diferentes modelos de radiación y su uso en herramientas de simulación numérica.
3. Definir los parámetros de funcionamiento necesarios para la caracterización de la arcilla
4. Realizar los cálculos y simulaciones numéricas necesarias para el desarrollo del diseño de un banco de prueba.
5. Elaborar el diseño en detalle de un banco de ensayos para el calentamiento por radiación.
6. Analizar la interacción entre la transferencia del calor y las particularidades físicas, químicas y térmicas del proceso a calentar, para examinar los efectos sobre la eficiencia energética, las emisiones, productividad (rapidez de calentamiento) y calidad del producto obtenido del proceso.

4. Marco teórico

La caracterización de arcilla por el fenómeno de transferencia de calor por radiación infrarroja para fines de secado involucra diferentes temáticas globales las cuales fueron desglosadas en los siguientes ítems a describir a lo largo del presente numeral (Las variables cuyas unidades no son mencionadas se encuentran en sistema internacional):

- Arcillas
- Transferencia de calor
- Transferencia de masa
- Hornos
- Modelos numéricos para la simulación de fenómenos radiantes

4.1 Arcillas

4.1.1 Definición

Minerales naturales cuya formación se remonta a millones de años atrás y reúnen características peculiares de composición y formación, motivo por el cual a lo largo de la historia han sido materiales usados para la manufactura de utensilios que sirven de cocción, vasijas de barro, embaldosados, entre otros [10]; por no decir que es un recurso común y abundante a nivel global lo que conlleva un alto uso [11].

Se definen como cualquier sedimento o depósito mineral granuloso (A veces fino) el cual posee plasticidad al tener contacto con agua [10], normalmente con un tamaño de grano inferior a 1/256 mm (4 µm) y principalmente compuesto por elementos como el Si, Al y H₂O (Por tal motivo denominados silicatos) junto a cantidades menores de Mg, Mn, Fe, Ca, Na y K [12].

4.1.2 Clasificación

Las arcillas poseen diferentes tipos de clasificaciones, tales como su mineralografía (Ricas en caolinita), quimismo (alto contenido de alúmina), origen geológico, propiedades físicas, utilización industrial, entre otros [13]. La clasificación principal o más común es la mineralógica, en la cual se realiza una taxonomía según sus componentes minerales arcillosos y no arcillosos, los cuales son los que brindan las características de plasticidad, secado y cocción de los productos [13], [14]. Dicha clasificación se encarga de subdividirla en 3 tipos como se puede apreciar en la Figura 1 y se definen como [15]:

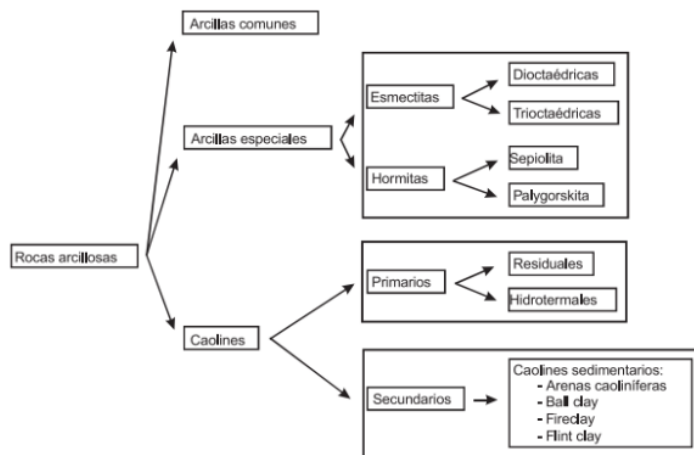


Figura 1. Clasificación de los materiales arcillosos (Díaz & Torrecillas, 2002).

Arcillas comunes: Arcillas utilizadas en el sector de la construcción (Ladrillos, tejas, revestimientos, entre otros) y alfarería (Industrias del cemento y agregados ligeros). La presencia de desengrasantes y sus diferentes tamaños de grano hace que sus propiedades cerámicas sean muy variadas, presentando una tendencia a baja plasticidad y color rojizo por contener óxidos de hierro entre 2 y 2.5%.

Arcillas especiales: Grupo de arcillas con baja aplicación en el campo cerámico utilizadas para usos específicos dada la poca variabilidad que presentan sus propiedades físicas, destacando así una alta superficie específica, buenas propiedades reológicas y su alto poder de adsorción. Se encuentran constituidas por un solo tipo de arcilla predominante y sus propiedades dependen directamente de ese mineral. Por tal motivo, las principales aplicaciones están relacionadas con su capacidad de adsorber múltiples sustancias en sus espacios interlaminares en el caso de la bentonita o en sus canales estructurales como la sepiolita y paligorskita [16].

**Reología: Rama de la física encargada de estudiar la viscosidad, plasticidad, elasticidad y derrame de la materia [17].*

Caolines: Corresponde a toda materia prima arcillosa con alta variedad y amplias aplicaciones industriales. Según Ross & Kerr [18], se define como roca masiva con bajo contenido de hierro y generalmente de color blanco u opaco, siendo la caolinita el mineral principal que se encuentra en este tipo de arcillas. Subdividiéndose en 2 tipos, primarios y secundarios.

Los caolines primarios se forman a partir de la roca madre en sitio, es decir, con depósitos autóctonos. Por otra parte, los caolines secundarios se originan por la erosión y mezcla de compuestos transportados por cuencas por mecanismos de precipitación (autigénesis) o alteración por enterramiento (diagénesis).

**Caolinita ($Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$): Mineral de arcilla que se forma a través de la meteorización (Descomposición de compuestos en la superficie terrestre al interactuar con la atmósfera, hidrósfera o biósfera [19], ver Figura 2) de minerales silicatos de aluminio (Feldspatos) con baja tendencia a la contracción y dilatación según la interacción con agua [20].*

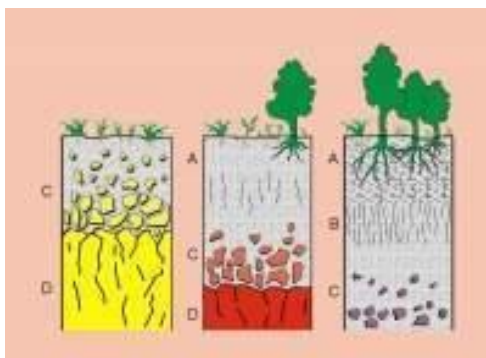


Figura 2. Descripción del proceso de meteorización [19].

4.1.3 Propiedades

Dados los múltiples usos que actualmente poseen las arcillas, es necesario caracterizar el tipo de propiedades que radican las diferentes aplicaciones que esta tiene. Por tal motivo, algunas de las propiedades físico-químicas más importantes son [21], [22]:

- **Superficie específica:** Relación del área superficial total respecto a la masa del sólido (m^2/g) o el volumen de este (m^2/m^3), por lo que a menor tamaño de partículas, mayor será su superficie específica [23].
- **Capacidad de absorción:** Capacidad de retención de agua (u otras moléculas) por medio de la capilaridad en los espacios internos que el sólido posee. Esta propiedad se encuentra relacionada con las características de porosidad (Espacios vacíos que dispone un material en su superficie [24]) y superficie específica del sólido. Se expresa en función de la masa y depende de la naturaleza de la arcilla y la sustancia que esta almacene. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor al 100 % con respecto al peso.

* *Capilaridad:* Fenómeno que hace que la superficie de un fluido, al estar en contacto con un cuerpo sólido, ascienda o descienda de acuerdo a si moja o no al elemento en cuestión [25].

- **Plasticidad:** Recubrimiento generado por el agua en las partículas de un sólido, dando lugar a un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce una fuerza sobre ellas. Se tiene alta plasticidad cuando el tamaño de partícula es pequeño, es decir, posee alta superficie específica y elevada capacidad de hinchamiento (Expansión del sólido por la absorción del líquido). Dicha propiedad se cuantifica por medio de los índices de Atterberg y este a su vez determina la cantidad de agua que contiene un material y es capaz de absorber.

**Los límites de Atterberg se definen como [26]:*

Límite líquido: Punto de paso del estado líquido al estado plástico. Caracterizado por la cantidad de agua que contiene un material en el momento que pierde la fluidez y la capacidad de escurrir.

Límite plástico: Punto de paso del estado plástico al estado semisólido. En este punto el material pierde la plasticidad y no puede ser modelado.

Límite de retracción: Transición entre el estado semisólido y el estado sólido, cuantificable por la cantidad de agua que contiene en el momento que cesa la contracción volumétrica que acompaña al secado.

Existe otra clasificación del suelo en cuanto al tipo de grano, la cual se observa en la Tabla 1, donde se puede apreciar que la arcilla posee el tamaño de grano más pequeño de todos los suelos, y por ende, al caracterizar y comparar con las propiedades anteriormente descritas, se infiere que en general las arcillas se adaptan a los procesos industriales de mejor manera que los otros granos, como se aprecia en la Figura 3:

Tabla 1. Clasificación de las partículas del suelo según su diámetro [27]

Fracción del suelo	Sistema del Dpto USA	Sistema Internacional
	Diámetro en mm	Diámetro en mm
Arena muy gruesa	1,0 - 2,0	
Arena gruesa	0,5 - 1,0	0,2 - 2,0
Arena media	0,25 - 0,5	
Arena fina	0,1 - 0,25	0,02 - 0,2
Arena muy fina	0,005 - 0,1	0,002 - 0,02
Limos	0,002 - 0,05	
Arcilla	< 0,002	< 0,002

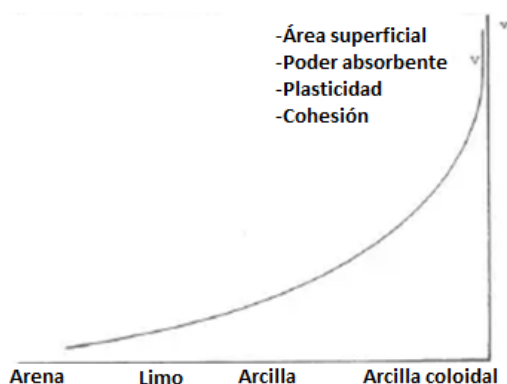


Figura 3. Relación de las propiedades del suelo según el tamaño de grano [28].

Entiéndase por arcilla coloidal como las arcillas especiales tales como la bentonita [29]. Cabe notar que, como se dijo anteriormente, estas arcillas poseen mejores propiedades que las demás sólo en un ámbito, según el mineral que predomine en su composición.

En cuanto al secado de este tipo de minerales, se debe recalcar que el secado convectivo requiere de alto tiempo de exposición, siendo este método el menos eficiente comparado con el secado por radiación tanto en el infrarrojo como microondas [3], por no dar mención a la posible contaminación del producto que se genera por el contacto directo con el material [1], [30]. Por otra parte, acorde a diversos autores [31], [32]; el secado de la arcilla genera agrietamiento de esta misma por esfuerzos cortantes, esto debido a que varios materiales porosos sufren contracción durante el proceso de secado. Como resultado, aumenta la tensión interna del sólido y disminuye la calidad por la generación de grietas. Dicha contracción se explica por el equilibrio entre la presión capilar ejercida por el líquido en los poros y el módulo elástico de la estructura que resiste la contracción; cuando prevalece esta última, la contracción se detiene. El final de la contracción corresponde a la aparición de porosidad en la muestra de arcilla porque la evaporación del agua no es proporcional a esta [33].

4.2 Transferencia de calor

El calor se define como la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro, como resultado de una diferencia de temperaturas. Esta busca analizar la rapidez de transferencia de energía térmica, además de tener una extensa área de aplicación que va desde los sistemas biológicos hasta aparatos domésticos, electrónicos, industriales, entre otros [34].

El calor se puede transferir en 3 modos diferentes:

1. Conducción.
2. Convección.
3. Radiación

Todos los modos requieren de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del elemento que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja.

Conducción: Se define como la transferencia de energía entre las partículas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción tiene lugar en los estados sólido, líquido y gas. En los líquidos y gases se da por las colisiones y la difusión de las moléculas; por otra parte, en los sólidos el calor se genera por las vibraciones de las moléculas. Dependiendo en sí de la naturaleza de la sustancia, el área transversal de flujo y el espesor de este [34].

Convección: Es la transferencia de energía que se genera entre una superficie sólida y un líquido o gas adyacente que se encuentra en movimiento comprendiendo los fenómenos de la conducción y el movimiento de fluidos. Dependiendo en sí del tipo de movimiento, la naturaleza del fluido y el área en contacto.

Radiación: Se considera como la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. Este tipo de transferencia no requiere de un medio para su propagación y además se considera la más rápida pues se desarrolla a la velocidad de la luz y no sufre atenuación al vacío. Además, dicho fenómeno se aplica a todas las sustancias tanto como sólidas, líquidas y gaseosas. Dependiendo estrictamente del área superficial, la configuración geométrica, la emisividad del sólido (es decir que tanta radiación emite respecto a una emisión ideal).

La principal ventaja de un sistema de calentamiento por radiación es que los productos resultantes de la combustión no tienen contacto directo con la carga que se calienta (En este caso arcilla). Además, asegura una distribución uniforme en la temperatura, homogenización en el sólido y evitando contaminación de la carga [35]. Cabe añadir que, comparados con un proceso de calentamiento por convección, estos mejoran la productividad y disminuyen el consumo de energía [36].

4.2.1 Transferencia de calor por convección

Comprende la energía añadida o extraída por el movimiento de un fluido en contacto con un sólido, aunque el mecanismo de difusión (movimiento aleatorio de las moléculas del fluido) contribuye a esta transferencia, generalmente la aportación dominante es la del movimiento global de las partículas del fluido [37]. Inicialmente, para dar entendimiento a este tipo de transferencia de calor se deben comprender los mecanismos físicos que fundamentan la convección, y por otra parte, desarrollar los diferentes medios para llevar a cabo los cálculos de transferencia de calor. Por tal motivo, a partir de la literatura se tienen algunos conceptos a detallar [37], [34].

La experiencia a lo largo de la historia ha demostrado que la transferencia de calor por convección es totalmente dependiente de las siguientes propiedades tanto del fluido como del sólido:

- Viscosidad dinámica
- Conductividad térmica
- Densidad
- Calor específico
- Velocidad del fluido
- La configuración geométrica
- Aspereza de la superficie
- Régimen del flujo

Por lo tanto, tal mecanismo de transferencia de calor se podría considerar como complejo, más aún se ha demostrado que es proporcional a la diferencia de temperaturas entre el fluido y el sólido y se expresa por medio de la ley de enfriamiento de Newton en la Ecuación (1), [34]:

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad (1)$$

Donde:

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección $[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$

A_s = Área superficial de transferencia de calor $[m^2]$

T_s = Temperatura de la superficie $[^\circ C]$

T_∞ = Temperatura del fluido fuera de la capa límite $[^\circ C]$

Nótese que la expresión, aunque parezca sencilla, esta sigue dependiendo de los términos escritos anteriormente y se ven reflejados en el coeficiente convectivo el cual se puede definir como la razón de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia en la temperatura. Hallar dicho coeficiente depende de los siguientes conceptos [34], [37], [38]:

- **Número de Nusselt:** Parámetro adimensional que describe la razón de la energía térmica convectiva del fluido con respecto a la conducida dentro de este. Entre mayor sea el número de Nusselt, más eficaz es la convección, si este número corresponde a 1 es porque la transferencia de calor es conducción pura. La relación de Nusselt se expresa en la ecuación (2):

$$Nu = \frac{\text{Calor convectivo}}{\text{Calor conducido}} = \frac{hL_c}{k} \quad (2)$$

Donde, h corresponde al coeficiente convectivo, L_c a la longitud característica de la geometría por la que circula el fluido y k la conductividad del fluido.

- **Flujo interno y externo:** Al forzar un fluido en un canal no confinado sobre una superficie, sea un arreglo de tubos, alambres, cilindros, esferas o una placa, se habla de un flujo externo. Por otra parte, si el flujo se encuentra en una especie de tubo o ducto confinado se habla de flujo interno, estos son dominados por la influencia de la viscosidad en todo el campo de flujo, a diferencia del flujo externo que sólo se ve reflejado en la capa límite. La Figura 4 muestra el desarrollo del fluido tanto en interno como externo:

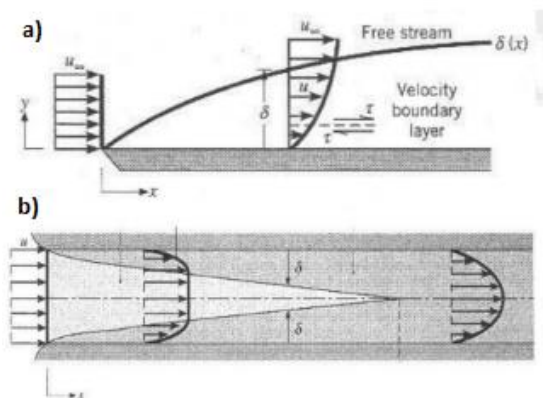


Figura 4. a) Flujo externo, b) Flujo interno [37]

- **Flujo laminar y turbulento:** El concepto de turbulencia se puede asociar a perturbaciones o distorsiones asociadas en las líneas de un flujo. Ahora, entiéndase como flujo laminar a la corriente libre de perturbaciones con características suavizadas y un movimiento altamente ordenado. Por el contrario, un flujo turbulento posee altas fluctuaciones en la velocidad y un movimiento altamente desordenado (Ver Figura 5). Existe también una etapa intermedia que se conoce como flujo en transición y ocurre cuando un flujo libre de perturbaciones empieza a presentar fluctuaciones; de igual forma, para el análisis de calor convectivo un flujo en transición ya se considera como turbulento.

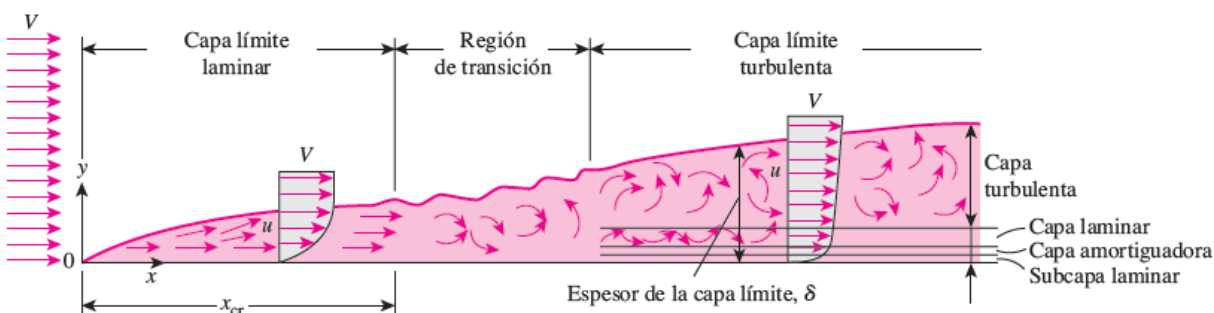


Figura 5. Régimen de flujo [34]

La forma de definir a qué tipo de régimen pertenece el flujo es por medio de un número adimensional, conocido como el número de Reynolds. El cuál se encarga de relacionar las fuerzas inerciales respecto a las fuerzas viscosas, de tal manera que si las fuerzas inerciales son mucho mayores (O a su vez, las fuerzas viscosas muy pequeñas) se habla de un flujo turbulento. Expresándose en la ecuación (3):

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{VL_c}{\nu} = \frac{\rho VL_c}{\mu} \quad (3)$$

Siendo:

- V: Velocidad de la corriente superior
- L_c: Longitud característica de la configuración geométrica
- $\nu = \frac{\mu}{\rho}$: Viscosidad cinemática del fluido
- μ : Viscosidad dinámica del fluido
- ρ : Densidad del fluido

Dependiendo del arreglo y el tipo de flujo (si es flujo interno o externo, en placa o tubos, entre otros); existen diferentes rangos para definir si el flujo se encuentra laminar o turbulento, los cuales se pueden encontrar en la literatura referenciada para el presente ítem o diferentes artículos.

- **Número de Prandtl:** Número adimensional que relaciona la difusividad molecular de la cantidad de movimiento y la difusividad molecular del calor.

$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular de la cantidad de movimiento}}{\text{Difusividad molecular del calor}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (4)$$

Donde α corresponde a la difusividad térmica y C_p al calor específico del fluido.


Si este número tiende a 1, indica que la cantidad de movimiento y el calor se disipan en el fluido a igual velocidad. Por otra parte, si este valor es menor a 1, el calor se difunde más rápido que el movimiento.

Existen 2 tipos de convección, natural y forzada. Dichos términos hacen alusión a si el movimiento del flujo implica un agente externo o no, en otras palabras, la manera en la que se genera el desplazamiento del fluido. En la convección forzada se obliga a que fluya por medio de agentes externos como una bomba o un ventilador. Por el contrario, en la convección natural cualquier movimiento del fluido se origina por medios naturales, es decir el efecto de la flotación al adquirir una diferencia de densidad si el fluido está caliente.

Nota: Hasta este punto y en adelante, el presente trabajo se enfoca en la convección forzada debido a que las pruebas híbridas se realizarán por medio de un túnel de secado que impulsa el aire por medio de un ventilador. Si el lector desea profundizar acerca de la convección natural, se invita a leer en las diferentes bibliografías referenciadas.

Muchos autores han logrado desarrollar diferentes medios para calcular el Nusselt y con este hallar el coeficiente convectivo, estos medios son ecuaciones conocidas como correlaciones. Las cuales dependen de los diferentes arreglos geométricos y el tipo de flujo, en otras palabras, del Reynolds, el Prandtl, la naturaleza del fluido y la geometría. Dichas correlaciones se pueden encontrar en la diferente literatura [34], [37], [38], o en algunos artículos donde se desarrollen experimentos para el cálculo de este en geometrías específicas [39]. Como ejemplo, se presenta en la Tabla 2 una serie de correlaciones extraídas de Zukauskas, 1972, y Jakob, 1949 para flujo cruzado en un sólido cuya geometría es cilíndrica.

Tabla 2. Correlación de flujo cruzado en un cilindro [34]

Sección transversal del cilindro	Fluido	Rango de Re	Número de Nusselt
	Gas o líquido	0.4-4	$Nu = 0.989Re^{0.330} Pr^{1/3}$
		4-40	$Nu = 0.911Re^{0.385} Pr^{1/3}$
		40-4 000	$Nu = 0.683Re^{0.466} Pr^{1/3}$
		4 000-40 000	$Nu = 0.193Re^{0.618} Pr^{1/3}$
		40 000-400 000	$Nu = 0.027Re^{0.805} Pr^{1/3}$

Finalmente, con el valor obtenido del Nusselt con las condiciones de Re y Pr, se procede a determinar el coeficiente convectivo de la ecuación (2) y consecuentemente se calcula el calor convectivo del sistema a evaluar.

4.2.2 Transferencia de calor por radiación

Para comprender la temática de transferencia de calor por radiación, es necesario entender y establecer algunas definiciones principales y referentes a dicho tema.

La emisión de energía en forma de radiación se debe principalmente a las vibraciones y rotación de las moléculas, las cuales se describen en dos teorías [40]. Una asume la radiación como ondas electromagnéticas y por otra parte, la otra los considera como paquetes llamados fotones [34]. Esta, hace referencia al calor que emite un cuerpo debido a la excitación de electrones que se genera al interactuar con la temperatura y abarca ondas cuya longitud se encuentra en el rango visible, ultravioleta e infrarrojo; es decir entre 0.1 y 100 micrómetros como se aprecia en la Figura 6.

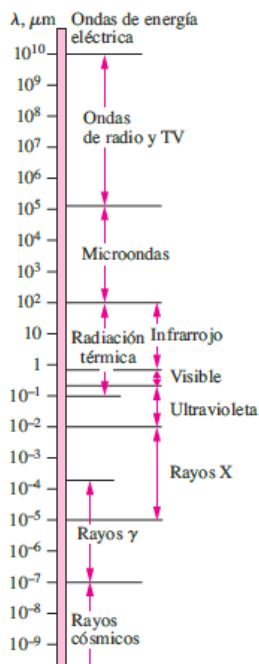


Figura 6. Espectro electromagnético [34]

4.2.2.1 Definiciones

Para dar entendimiento a los modelos matemáticos de transferencia de calor por radiación se deben introducir los siguientes conceptos [34]:

- Cuerpo negro:** Todo cuerpo emite radiación en diferentes longitudes de onda, siempre y cuando este se encuentre por encima de 0 K. Para cuantificar el calor emitido se debe comprender que este es dependiente de la geometría, color, distancia y material del cuerpo; por lo tanto, para caracterizar la emisión de un cuerpo se hace referencia a cuánto emitiría un cuerpo ideal a la misma temperatura. De tal manera, un cuerpo negro está definido como “*un emisor y absorbedor perfecto de la radiación*”. Esto significa que un cuerpo negro idealmente se encarga de absorber todos los rayos que inciden en él, y de igual manera, emitir energía en toda dirección de manera uniforme (Es decir es un emisor difuso). La energía que un cuerpo negro puede emitir es la máxima que una superficie a igual temperatura emite, dicha energía se conoce como poder de emisión de cuerpo negro y se encuentra expresado en la ecuación (5):

$$E_b = \sigma T^4 \quad (5)$$

Siendo:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ (Constante de Stefan – Boltzmann) } \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$T =$ Temperatura absoluta de la superficie [K]

Esta expresión sólo se cumple si se considera que el cuerpo negro emite a igual longitud de onda en toda dirección, es decir no es función del ángulo sólido, ángulo azimutal o la longitud de onda misma. De querer indagar en un desarrollo más profundo acerca del poder de emisión se recomienda al lector remitirse a la bibliografía referenciada.

- **Sólido opaco y transparente:** Sólido que al interactuar con una fuente radiante (y por ende una onda electromagnética), este sólo refleja y/o absorbe la radiación de dicha fuente, además de que la interacción de la onda se genera superficialmente. Por otra parte, el sólido transparente además de reflejar y absorber el calor, también se encarga de transmitir una fracción del rayo incidente, como se muestra en la Figura 7.

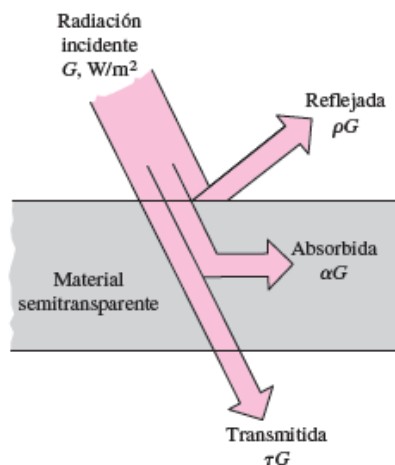


Figura 7. Balance de energía del sólido transparente [34]

- **Intensidad de radiación (I_e):** Magnitud de la energía emitida (o absorbida) en una dirección específica, por unidad de tiempo, de longitud de onda y de área normal a la dirección dentro de un ángulo sólido determinado. Entendiéndose por ángulo sólido (ω) como el ángulo formado por el vector normal de un diferencial de área respecto al eje vertical, como se muestra en la Figura 8.

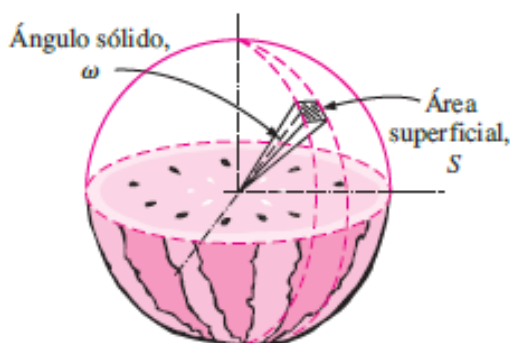


Figura 8. Ángulo sólido [34]

- **Superficie difusa y gris:** Una superficie es difusamente emisora, cuando la intensidad de radiación emitida por dicha área es independiente de la dirección, es decir, la magnitud de la radiación o intensidad es constante en toda su superficie. Por otra parte, se considera una superficie gris si sus propiedades son independientes de la longitud de onda.
- **Radiosidad:** Así mismo que un sólido recibe radiación de agentes externos a él, este por encontrarse a una temperatura mayor a 0 K también emite radiación en el espectro a su alrededor. De tal manera

que, se define radiosidad como la suma de la componente emitida más la reflejada de una superficie como se muestra en la Figura 9:

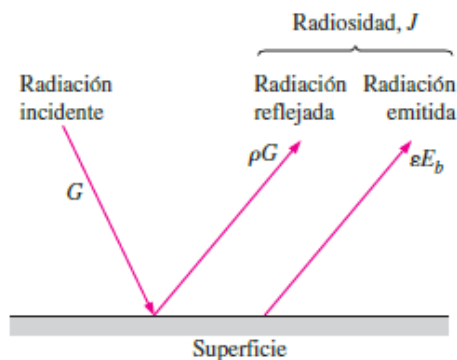


Figura 9. Radiosidad [34]

- **Irradiancia:** Magnitud que representa la razón entre la potencia incidente en un sólido, respecto al área superficial de este. A diferencia de la radiancia, que hace referencia a la radiosidad sobre unidad de área.

4.2.2.2 Propiedades

Una vez definida la diferente terminología a implementar acerca de la radiación infrarroja, se procede a conocer las diferentes propiedades que tienen los cuerpos en cuanto a la transferencia de calor por radiación [37]:

- **Emisividad (ϵ):** Razón entre la radiación emitida por una superficie a cierta temperatura respecto a lo que irradiaría un cuerpo negro a igual temperatura. Puede adquirir valores entre 0 y 1, aunque este valor es variable en una superficie real, siendo dependiente de la temperatura, la longitud de onda y la dirección de onda radiada. Representándose con la ecuación (6):

$$\epsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{b,\lambda}(\lambda, T)} \quad (6)$$

Siendo:

λ : longitud de onda [m]

θ : Ángulo Cenital [°]

ϕ : Ángulo azimutal [°]

Nótese que el ángulo cenital y azimutal no han sido mencionados anteriormente pues estos se encuentran implícitos en el ángulo sólido para describir la dirección de la radiación. También cabe notar que la intensidad de radiación del cuerpo negro no es dependiente de dichos ángulos pues se considera que la emisión de este es igual en toda dirección.

Por practicidad, se suele asumir que el cuerpo es gris y difuso, es decir, independiente de la dirección y de la longitud de onda, a tal punto de depender únicamente de la temperatura y siendo denominada emisividad hemisférica total (o emisividad promedio). Cabe anexar que es una aproximación muy ideal debido a que la

longitud de onda es dependiente de la temperatura, pero para bastantes usos ingenieriles es adecuado utilizar dicho análisis [34]. Obteniéndose la ecuación (7):

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{E(T)}{\sigma T^4} \quad (7)$$

Siendo E(T), el calor emitido por una superficie a una temperatura T, presentando gráficas con tendencias similares en función de la temperatura como en la Figura 10, o en función de la longitud de onda como la Figura 11.

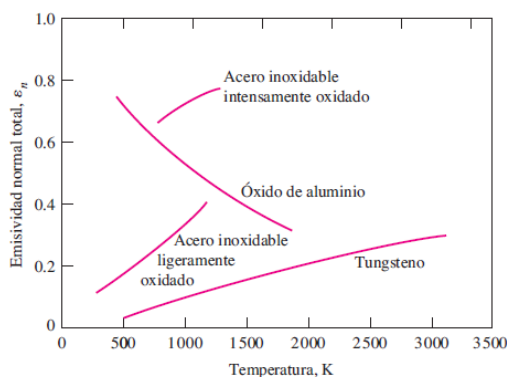


Figura 10. Variación de la emisividad con la temperatura en metales [34]

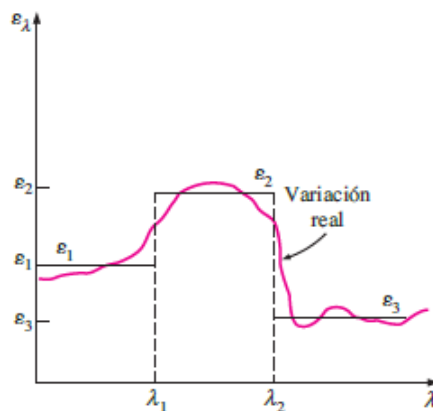


Figura 11. Variación de la emisividad en función de la longitud de onda [34]

- **Absortividad (α), reflectividad (ρ) y transmisividad (τ):** Como se ha dicho antes, todo cuerpo por el hecho de tener una temperatura superficial superior a 0 K emite radiación y la emisividad es la encargada de caracterizar cuánto irradia dicho cuerpo. Al interactuar con los alrededores, es decir, en otra superficie, el rayo incidente puede interactuar de 3 formas: Puede ser absorbido por el sólido y calentarlo por conducción desde la superficie, también se puede reflejar y por ende redirigir a otra superficie como tal, hasta la misma fuente; o a su vez, el sólido puede no interactuar con la onda como tal y sólo trasmitirla en la dirección que esta se dirigía. Estos son los 3 conceptos de absortividad, reflectividad y transmisividad respectivamente. Todo lo anterior se puede detallar en la Figura 7.

Nótese que la terminación “ividad” hace referencia a que es un fenómeno superficial, si se encontrase un texto con la terminología “ancia” es porque este es un fenómeno volumétrico, aplicado en las microondas, por ejemplo.

Como ejemplo se tiene un vehículo el cual se encuentra estacionado y sometido a radiación solar, este vehículo se calentará internamente por los rayos transmitidos al interior, los vidrios también elevarán su temperatura por la absorción de calor y una parte del calor será reflejado a los alrededores. Estos conceptos se denotan en las siguientes expresiones:

$$\text{Absortividad } \alpha = \frac{\text{Radiación absorbida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{abs}}{G_{in}} \quad (8)$$

$$\text{Reflectividad } \rho = \frac{\text{Radiación reflejada}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{ref}}{G_{in}} \quad (9)$$

$$\text{Transmisividad } \tau = \frac{\text{Radiación transmitida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{tr}}{G_{in}} \quad (10)$$

Nótese que por conservación de la energía:

$$G_{in} = G_{abs} + G_{ref} + G_{tr} \quad (11)$$

Sustituyendo las ecuaciones (8), (9), (10) en (11) se obtiene que:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (12)$$

Al igual que la emisividad, estas propiedades son dependientes del ángulo azimutal, cenital y de la longitud de onda. Por lo tanto, por efectos de simplificación se asume que la dirección de radiación es igual en todos los sentidos, siendo únicamente dependiente de la longitud de onda para tomarse como propiedades hemisféricas espectrales o promedio. También se asume que la reflexión generada por la superficie es difusa y especular, es decir, el ángulo de incidencia respecto al eje normal de la superficie es igual al ángulo que forma la reflexión con el mismo eje, ver Figura 12:

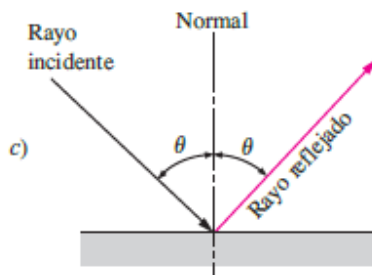


Figura 12. Reflexión difusa y especular [34]

Nótese que, en la realidad el rayo incidente al ser reflejado se dispersa en toda dirección con diferentes magnitudes. Aun así, si se desea indagar sobre los desarrollos conceptuales y detallados de las propiedades, se tienen las referencias [34] y [37].

- **Factor de visión/forma:** Para las propiedades anteriormente descritas se ha definido una radiación incidente que interactúa con una superficie receptora. Pero ¿Cómo se determina cuánta radiación de una fuente afecta una superficie específica? En vista de que la radiación es un fenómeno multidireccional dependiente de la orientación como se muestra en la Figura 13. Para dar respuesta a ello se tiene el concepto de factor de visión o forma (Según la literatura que se utilice de

referencia). El factor de visión se define como la fracción de radiación que emite una fuente e intercepta directamente una superficie.

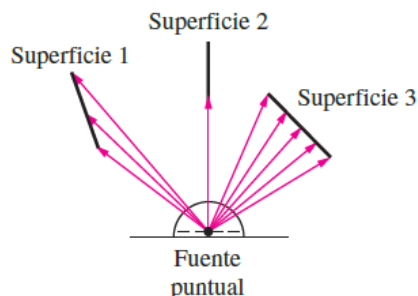


Figura 13. Intercambio de calor por radiación entre superficies [34]

El intercambio de radiación involucra temáticas como la óptica y la transferencia de calor, y su análisis se desarrolla suponiendo espacios aislados en un medio transparente, es decir que no absorba calor como el aire, que a diferencia del vapor de agua o el dióxido de carbono estos retienen el calor. Matemáticamente, la expresión que describe el factor de visión en un sistema con 2 superficies de área 1 y 2 como se muestra en la Figura 14, se expresa en la ecuación (13):

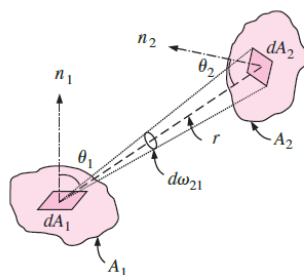


Figura 14. Configuración geométrica para hallar el factor de forma [34]

$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = F_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (13)$$

Siendo:

- θ_1, θ_2 los ángulos que forman la línea que une las dos superficies respecto al vector normal para cada área.
- r la distancia que hay entre ambas superficies.
- A_1, A_2 las áreas de las superficies 1 y 2.

Realizando la relación recíproca del factor de visión F_{21} y multiplicando por el área de la fuente, se obtiene que la integral doble es igual en ambos casos por lo que al igualar ambas expresiones se cumple la ecuación (14) conocida como relación de reciprocidad:

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad (14)$$

Nótese que:

- Sólo se cumple que $F_{12}=F_{21}$ si las áreas son iguales.

- $F_{i \rightarrow j}$ es la fracción de radiación que sale de i y choca en j .
- $F_{i \rightarrow i}$ Es una fracción de radiación que choca con la misma superficie, este caso sólo aplica cuando la superficie es cóncava.

Para hallar los diferentes factores de forma, existen múltiples relaciones matemáticas y tablas según la geometría de la fuente, la ubicación espacial, el receptor; por lo que se utilizan correlaciones tanto de los libros referenciados como de diferentes artículos [41], [42], [43].

Finalmente, para calcular la fracción de energía que emite una superficie 1 (con emisividad ϵ) a una superficie 2 se utiliza la ecuación (15). Cabe resaltar que esta fracción de energía es la utilizada como radiación incidente en las propiedades de absorptividad, transmisividad y reflectividad.

$$q_{rad} = F_{12} \epsilon \sigma T_1^4 \quad (15)$$

4.3 Teoría del secado

4.3.1 Secado

Por concepto de transferencia de masa es de saber que para que un sólido pierda humedad en un medio, la presión de vapor que ejerce el líquido en el sólido debe ser mayor que el vapor del líquido en el gas. El grado de presión es función de la humedad que este posee, la temperatura y del mismo sólido [44]. En la Figura 15, se muestra la variación de la humedad del sólido respecto a la humedad del gas; donde cabe destacar que, si se utiliza un gas con menor humedad este podría extraer mayor cantidad de fluido que se encuentra en el sólido.

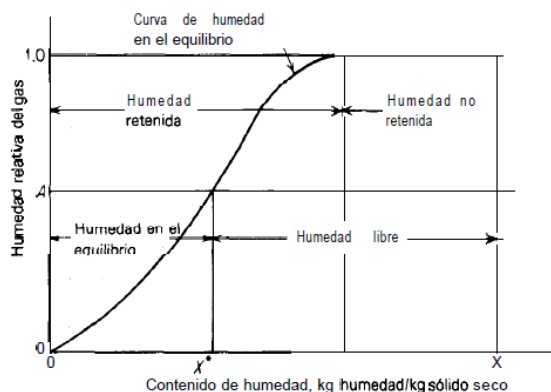


Figura 15. Contenido de humedad en el equilibrio típico de sólidos insolubles y tipos de humedad [44]

* Entiéndase por presión de vapor o presión de saturación como la presión a la que una fase líquida y una fase vapor de un mismo compuesto se encuentran en equilibrio sin intercambio de masa en ambas regiones. Dicho valor es dependiente de la temperatura [45].

Nótese que la Figura 15 muestra diferentes conceptos de humedad, explicándose de la siguiente manera [44]:

- **Humedad no retenida:** Humedad que se puede desligar del sólido usando un gas con una humedad relativa de 100%.
- **Humedad retenida:** Humedad que no se puede desligar del sólido usando un gas con una humedad relativa de 100%.

- Humedad libre: El valor de humedad que se puede desligar del sólido usando un gas de referencia A. Es decir, el valor en exceso que se encuentra respecto al equilibrio ($X-X^*$).
- Humedad en el equilibrio: Humedad en la cual la presión del vapor entre la interfaz sólido-gas es la misma.

Se debe entrever que el proceso de secado se basa en el análisis de pérdida de masa de un sólido, por esta razón, al graficar en el tiempo dicho proceso se obtienen gráficos tales como la Figura 16.

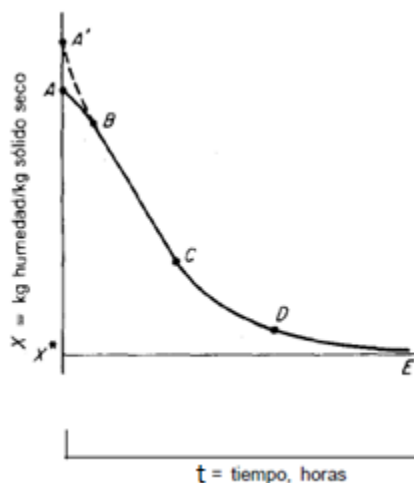


Figura 16. Humedad de un sólido sometido a secado en el tiempo [44]

De la Figura 16 se resalta la fenomenología de los diferentes intervalos de la siguiente manera:

- AB y $A'B$: Estas etapas se consideran como el ajuste inicial de la curva de secado, en la cual existe una capa delgada de humedad en la superficie del sólido que se encuentra en equilibrio con el medio. Al iniciar el secado se comienza a evaporar dicha capa generando una variación inicial en la masa evaporada, siendo dependiente de la cantidad de humedad del sólido y el gas, al igual que la temperatura superficial del sólido y de la corriente gaseosa. Si la superficie sólida se encuentra más fría, es decir con un delta de temperatura mayor, se genera un aumento en el flux de secado (Incrementando la pendiente, como la sección $A'B$) hasta alcanzar la temperatura superficial en la tasa de secado constante BC , o por el contrario, si el delta de temperatura del sistema sólido-gas es menor se inicia con una pendiente menos pronunciada, indicada en la sección AB , hasta que se ajusta al comportamiento de tasa constante.
- BC : Etapa en la cual se retira la humedad no ligada del sólido a una tasa de secado constante.
- CD y DE : Pérdida de la humedad ligada al sólido; nótese que, si el sólido se encuentra más seco, este se exige más tiempo para retirar la humedad que le queda.

Por otra parte, si se desea hallar la rapidez de secado, se deriva la anterior función en el tiempo para cada punto obteniéndose una gráfica como la Figura 17:

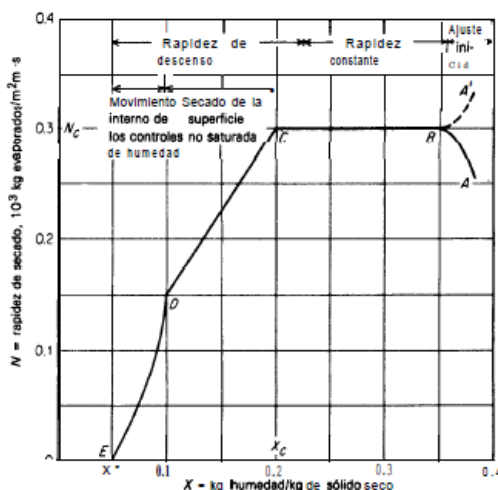


Figura 17. Rapidez de secado vs humedad en el sólido [44]

La etapa ED corrobora que la rapidez de secado disminuye con menor humedad en el sólido. También, durante la etapa de rapidez constante la evaporación se da desde la superficie modelándose a partir de una función de un coeficiente global de transferencia de masa del gas (K_C) [m/s], el área expuesta al fluido (A_x) [m^2] y la diferencia de concentración de humedad entre el fluido y la superficie (ΔC) [kg/m^3], expresándose en la ecuación (16):

$$\dot{m}_{H_2O(V),i} = A_x K_C \Delta C = A_x K_C (C_s - C) \quad \left[\frac{kg_{H_2O}}{s} \right] \quad (16)$$

Siendo C_s la concentración de humedad en la superficie del sólido y C la concentración en el líquido. En este caso se asume que el gas posee menos humedad que el fluido, de ser un caso contrario sería un proceso de adherencia. Durante esta etapa el proceso es isotérmico debido a que los capilares y espacios que posee el sólido internamente se encuentran ocupados por el H_2O y por diferencia de concentración en el mismo sólido se desplaza hasta la superficie donde es removido por el aire de secado manteniéndose constante ΔC . Una vez se escasea el H_2O se generan puntos secos superficiales, disminuyendo el flux de masa y por lo tanto decayendo la rapidez de secado hasta el punto donde el flujo de concentración interno del sólido disminuye y a su vez la tasa de secado.

Para calcular el coeficiente de transferencia de masa se realiza un símil referente a la transferencia de calor por convección (Ver ítem 4.2.1), es decir, se hace uso de los números adimensionales característicos de la transferencia de masa [34], [44].

$$k_c = \frac{S_h D_{H_2O-Air}}{L_c} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (17)$$

Donde:

- S_h es el número de Sherwood, el cual representa el cociente entre la transferencia de masa por convección y difusión [-].
- D_{H_2O-Air} corresponde a la difusividad binaria entre el vapor de agua y el aire a las condiciones de secado [m^2/s].
- L_c se define como la longitud característica determinada por el arreglo [m].

Para el cálculo de la difusividad binaria D_{H_2O-Air} se utiliza la teoría cinética de gases, que utiliza la ecuación (18), [44]:

$$D_{i,H_2O-air} = 2.662 * 10^{-9} \frac{\left[\frac{1}{2} * \frac{T^3 (W_{H_2O} + W_{air})}{W_{air} * W_{H_2O}} \right]^{\frac{1}{2}}}{p * \sigma_{H_2O-air}^2 * \Omega_{H_2O-air} * T_{H_2O-air}^*} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (18)$$

Siendo:

- T : Temperatura a la que se calcula el coeficiente difusivo [K].
- W : Peso molecular [kg/kmol_i].
- σ : Diámetro de partícula [nm].
- Ω : Integral de colisión [-].
- p : Presión [atm].
- T_{i-j}^* : Temperatura corregida respecto al potencial de Lennard-Jones [-].

* Los datos de W y σ son datos accesibles en bases de datos tales como “Knovel Corporation”.

Para calcular la integral de colisión y la temperatura corregida [46], [47]; estas son dependiente de la relación ε/k de cada componente y la temperatura, siendo ε la energía de interacción molecular y k la constante de Boltzmann (1.38×10^{-16} erg/K), así mismo dicha relación se denomina potencial de Lennard-Jones.

De tal manera que la integral de colisión se define en un polinomio dependiente de T^* , la cual se halla con las siguientes expresiones:

$$T_{i-j}^* = \frac{T}{\left(\frac{\varepsilon}{k}\right)_{i,j}} \quad \therefore \quad \left(\frac{\varepsilon}{k}\right)_{i,j} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{k}\right)_i \left(\frac{\varepsilon}{k}\right)_j} \quad \therefore \quad \sigma_{i,j} = \frac{\sigma_i + \sigma_j}{2} \quad (19)$$

Finalmente, el polinomio que expresa la integral de colisión se muestra en la ecuación (20):

$$\Omega_{i,j} = 1.069 T^{*0.158} + 0.3445 e^{-0.653 T^*} + 1.556 e^{-2.099 T^*} + 1.976 e^{-6.488 T^*} \quad (20)$$

Posteriormente, el cálculo del número de Sherwood se realiza con correlaciones de forma análoga al cálculo del número de Nusselt (Transferencia de calor por convección). Dependiendo así este del número de Reynolds y del número de Schmidt

Número de Schmidt: Parámetro adimensional que relaciona en forma de cociente entre la difusión de movimiento y la difusión de masa, mostrado en la expresión (21):

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D} \quad (21)$$

Donde:

- μ : Viscosidad dinámica [kg/m s]
- ρ : Densidad [kg/m³]
- D : Coeficiente de difusividad [m²/s]

De acuerdo a I. Hammouda, et al [3], la forma más corta para secar un material es empleando el secado híbrido (convección + radiación), destacando que, desde el principio que se emplea dicho método, la masa

evaporada es mayor respecto al secado en convección pura e híbrida (convección + microondas). Lo anterior debido a que el infrarrojo es un secado superficial que conlleva a altos gradientes de concentración y temperatura, aumentando la velocidad de secado y acelerando el tiempo de este mismo. En el secado híbrido con radiación infrarroja, las moléculas del material absorben la radiación en ciertas longitudes de onda de forma directa reduciendo las pérdidas de energía, dependiendo así del factor de forma y la absorptividad [48]. Cabe añadir que este método reduce el costo energético debido a que estas fuentes son más económicas en comparación con las fuentes dieléctricas y de microondas, además, el alto contenido de humedad permite más absorción de la radiación, dado que la humedad no es transparente al infrarrojo y por ende aumenta la eficiencia y la temperatura superficial [3].

4.3.2 Balances de energía en el secado

Durante la tasa de secado constante, todo el calor es absorbido por la película superficial de humedad y este calor es conocido como calor latente (Energía requerida para fundir un sólido o vaporizar un líquido [49]). Representándose en la expresión (22):

$$q_{in} = m_{H_2O} h_{fg} \quad (22)$$

Siendo:

- m: Masa de agua evaporada [kg].
- h_{fg} : Entalpía de vaporización del agua [kJ/kg].

Una vez en la etapa de rapidez de secado decreciente, dados los puntos carentes de humedad, el sistema se encuentra sometido a calor latente y calor sensible (Energía requerida para elevar o disminuir 1 °C [49]), siendo función de la temperatura superficial. Por lo tanto, el balance de energía quedaría expresado en la ecuación (23):

$$q_{in} = \int_{T_i}^{T_f} C_{p_{sólido}} m_{sólido} dT + \int_{T_i}^{T_f} C_{p_{H_2O}} m_{H_2O} dT + h_{fg} * m_{H_2O(v)} \quad (23)$$

4.4 Hornos

4.4.1 Definición

Equipos encargados de realizar transformaciones y/o tratamientos a materia prima haciendo uso de la energía térmica, obteniéndose un producto final o intermedio de un proceso industrial para su posterior elaboración [50]. La energía térmica se genera por medio de la oxidación de combustibles que pueden ser sólidos, líquidos y gaseosos y esta a su vez, se puede transferir de forma directa o indirecta en el material [51]. La energía se puede transferir a la carga por convección forzada y radiación cuando el horno opera con gases calientes producto de una combustión; o así mismo, cuando trabaja con resistencias eléctricas el calor se transfiere por radiación y convección natural y en ambos casos, el calor de la carga se transfiere por conducción desde la superficie hasta el interior de esta [34].

Inicialmente, la carga gana calor sea en forma de calor sensible o latente hasta el punto donde se originan transformaciones tales como: cambios químicos, liberándose energía debido al rompimiento de enlaces y cambios físicos, como transformaciones cristalinas, fusión, secado del material, entre otros [50]; todo lo anterior dependiente de la naturaleza de la carga y la temperatura a la que sea elevada. Por tal motivo, se caracterizan 3 o más etapas en el proceso de transformación (Principalmente calentamiento, sostenimiento

y enfriamiento), las cuales deben ser controladas para tener un producto que cumpla los parámetros deseados y a su vez minimizar el impacto ambiental con un máximo rendimiento posible. Así, Los procesos que implican hornos tienen curvas características de temperatura de la carga respecto al tiempo, manteniéndose un control de la evolución de la temperatura de la carga en el interior del horno [51].

4.4.2 Clasificación

En general, los equipos de calentamiento se pueden clasificar en diferentes tipos, que incluyen:

- Modo de operación (Batch –intermitente- y continuo).
- Sistema de manejo de materiales.
- Tipo de elemento calefactor.
- Tipo de método de calentamiento.
- Tipo de energía usada.

De acuerdo con la literatura, dichas clasificaciones están definidas como [51]:

Hornos según su modo de operación

Durante el calentamiento, una carga puede moverse continuamente a través del equipo del proceso (modo continuo) o quedarse en su lugar con una carga calentada a la vez (por lotes). En el modo continuo, la carga se mueve continuamente hacia el horno, y en varios casos se llevan a cabo repetidos pasos del proceso de calentamiento en zonas o ubicaciones designadas que se mantienen a una temperatura específica o bajo condiciones específicas. Un horno continuo generalmente posee la capacidad de funcionar de manera ininterrumpida, siempre y cuando la carga siga alimentándose en el horno. En el modo por lotes, todos los pasos del proceso de calentamiento (es decir, calentamiento, sostenimiento y enfriamiento) se llevan a cabo en un solo lugar ajustando las condiciones a lo largo del tiempo, además se calientan cargas individuales de materia prima.

Hornos según el sistema de manejo de materiales

La selección del horno por la clasificación del sistema de manejo de materiales depende de las propiedades mismas del material, el método de calentamiento empleado, el modo de operación (continuo o por lote) y el tipo de energía utilizada. Una característica importante de los equipos de calentamiento de proceso es cómo se mueve, se maneja y se saca la carga del sistema.

- Sistemas de calentamiento de fluidos (flujo continuo): Sistemas en los que un líquido, vapor o lodo de un proceso se bombea a través de tubos, tuberías o conductos ubicados dentro del sistema de calefacción mediante bombas o compresores.
- Transportador, correas, cubos, sistemas de rodillos: Sistemas en los que un material se traslada a través del sistema de calentamiento. La pieza de trabajo se mueve a través del horno sobre correas o rodillos accionados. La pieza de trabajo podría estar en contacto directo con el mecanismo de transporte (correa, rodillo, etc.), o podría estar soportada por una bandeja o contenida en un recipiente, que esté en contacto o unido al mecanismo de transporte.
- Hornos rotativos: Sistemas en los que el material viaja a través de un tambor o barril giratorio mientras se calienta o se seca mediante quemadores de combustión directa o mediante calentamiento indirecto desde la carcasa del horno.

- **Sistemas de horno de eje vertical:** Son Sistemas en los que el material viaja de arriba hacia abajo (generalmente por gravedad) mientras se calienta/enfría por contacto directo de los gases calientes o indirectamente desde la carcasa de la cámara de fluidización.
- **Hornos giratorios de chimenea (Rotary hearth furnaces):** Sistemas en el cual la carga se coloca en una "mesa giratoria" mientras se calienta y enfría.
- **Hornos de viga andante:** La carga "camina" a través del horno utilizando vigas especiales para desplazarse. Los hornos suelen ser de combustión directa en varias zonas del horno
- **Horno de fondo de carro (Car Bottom Furnace):** El material se coloca en un "carro" que viaja a través del horno.
- **Sistemas continuos de hornos de lámina:** Sistemas en los que el material en forma de lámina o tira viaja a través de un horno en dirección horizontal o vertical mientras se calienta o enfría. El calentamiento del material podría ser por contacto directo con gases calientes o por radiación de las "paredes" calentadas del horno.
- **Sistemas verticales de manejo de materiales (a menudo utilizados en hornos de pozo o lotes verticales):** El material es soportado por un sistema de manejo de material vertical y se calienta mientras se "carga" en un pozo enterrado.
- **Otros tipos:** Sistemas que introducen el material de forma manual o automática en sales, aceite, aire, polímeros y otros materiales para calentamiento y enfriamiento. Otros sistemas también incluyen ciclón, agitador, empujador y campana superior.

Muchos tipos de hornos, como pozo o rotativo, pueden ser diseñados y configurados para operar en modo batch (intermitente) o continuo, dependiendo en cómo el material es alimentado al horno. Un horno de pozo que se usa para templar y se alimenta manualmente con un sistema de recogida y colocación es un horno intermitente, mientras que un horno de pozo utilizado para tratamiento térmico de material alimentado automáticamente con un sistema de manejo de material vertical es un horno continuo.

Hornos según el tipo de método de calentamiento

En principio, existen diferentes métodos de calentamiento, directo e indirecto. Los sistemas que utilizan métodos de calentamiento directo exponen el material a tratar directamente a la fuente de calor o productos de combustión; Los elementos calefactores pueden ser quemadores abiertos o elementos calefactores eléctricos abiertos. Los métodos de calentamiento indirecto separan la fuente de calor de la carga y pueden usar aire, gases o fluidos como medio para transferir calor del elemento de calentamiento a la carga (por ejemplo, hornos de convección). Los elementos calefactores incluyen tubos de quemadores radiantes y elementos calefactores eléctricos cubiertos.

Hornos según el tipo de elemento calefactor

Hay muchos tipos de elementos calefactores básicos que pueden ser utilizados en sistemas de calentamiento. Algunos de estos son: Tubos de quemadores radiantes, paneles calefactores, bandas, tambores y varios tipos de elementos de calefacción eléctrica.

Hornos según el tipo de energía utilizada

El tipo de energía utilizada en un proceso de calentamiento está estrechamente relacionada al tipo de equipos utilizados, tales como:

- Basados en combustión: Incluye hornos que utilizan quemadores de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. La combustión produce gases a altas temperaturas que son utilizados para calentar el material. El calentamiento puede ser directo o indirecto.
- Basados en electricidad: Incluye calentamiento por inducción, arco o plasma.
- Vapor: Incluye calderas o generadores de vapor basados en procesos de calentamiento indirectos.
- Otros: Utiliza líquidos calientes o gases en contacto indirecto con el material o mediante transferencia de calor indirecta con un intercambiador de calor.

4.4.3 Hornos destinados para el proceso de secado

Los hornos de secado industrial son máquinas utilizadas para procesar materiales cuyo contenido de humedad requiere ser menor para una aplicación [52]. Para lograr dicha extracción, se hace uso de los fenómenos de transferencia de calor y la absorción por aire, a diferencia de un deshidratador que utiliza medios mecánicos para extraer la humedad [8]. Existen múltiples tipos de secadores, los cuales son dependientes de múltiples variables tales como [53]:

- Capacidad
- Calidad del producto
- Tamaño del producto
- Consistencia
- Horas de operación
- Masa de agua evaporada
- Acidez del producto
- Condiciones ambientales

Basado en los anteriores parámetros de selección, algunos secadores más utilizados en la industria son [53]:

Secador tipo flash: Su nombre se origina debido a que este tipo de secado se realiza en periodos de tiempo cortos, alrededor de 0.5 a 3 segundos. Su fenomenología se fundamenta en evaporar la humedad de la superficie de forma instantánea siendo el material húmedo arrastrado por medio de un gas caliente que fluye por un conducto aislado. Las partículas se secan y la temperatura del gas disminuye por la pérdida de calor sensible. En la mayoría de los sistemas, el aire se utiliza como gas de remoción ocasionando que el sólido húmedo se desintegre y a su vez genere sólidos más finos y por ende aumentando el área superficial. El sólido sostiene la temperatura de bulbo húmedo del aire y utiliza velocidades cercanas al transporte neumático siendo transportado mientras se seca; por lo tanto, a veces se denomina secador neumático [54]. Un esquema de montaje un secador flash se aprecia en la Figura 18.

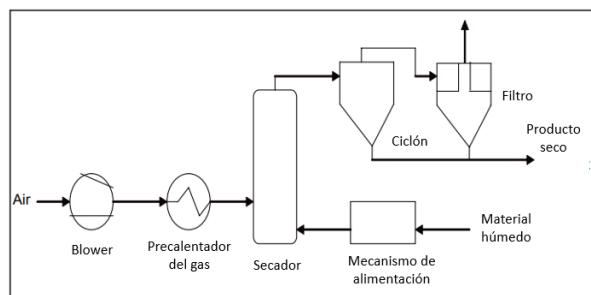


Figura 18. Esquema de un secador flash [54]

Secador de lecho fluidizado[53]: Utiliza un recipiente equipado con jets orientados verticalmente de tal forma que dirige gases calientes en un lecho de material húmedo ubicado de forma perpendicular al chorro, obteniéndose una transferencia uniforme de energía térmica y a su vez reduciendo la humedad en el producto. Para obtener un secado adecuado, la partícula debe tener una forma cuasi esférica al igual que un tamaño pequeño, uniforme y homogeneidad en el contenido de humedad [53]. Un esquema de este tipo de secadores muestra en la Figura 19.

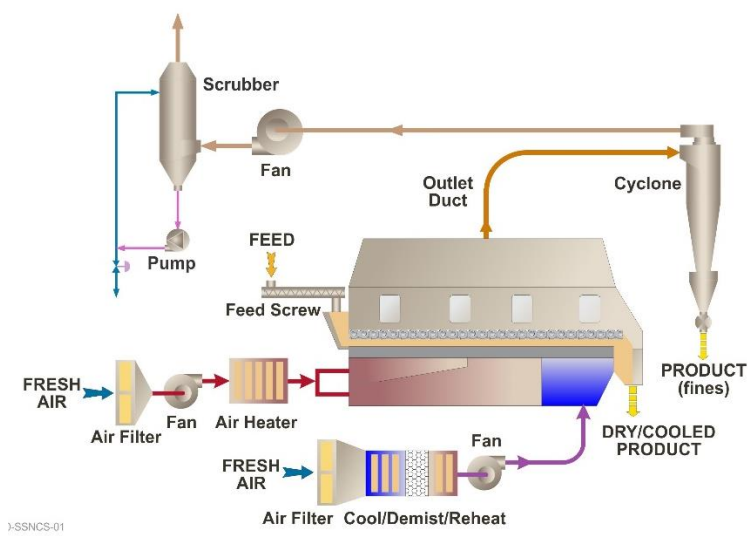


Figura 19. Esquema de secador de lecho fluidizado [55]

Secador rotativo: Hace uso de un tambor cilíndrico giratorio que se encarga de contener y transportar el material internamente, haciendo uso del impulso del gas de secado y la gravedad por medio de tramos internos inclinados o elevadores, de tal manera que se genera una cortina de material y este es sometido a una corriente de gas, el cual calienta el sólido y extrae la humedad de este [56]. El esquema del secador rotativo se presenta en la Figura 20.

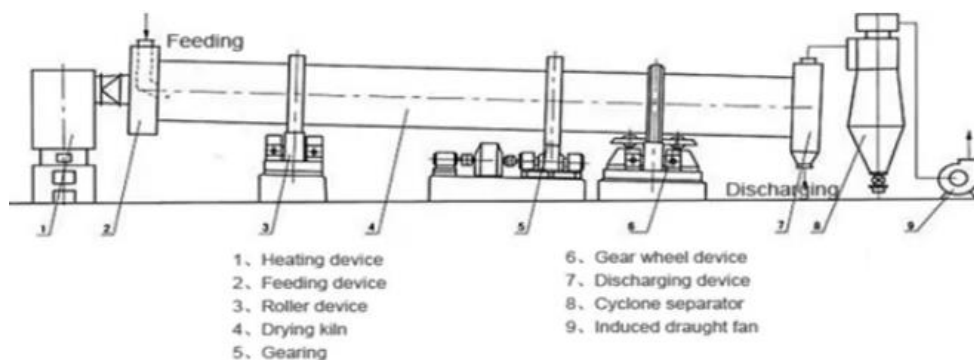


Figura 20. Esquema de secador rotativo [56]

Basado en el tipo de transferencia de calor, los secadores rotativos pueden ser de calentamiento directo o indirecto, tomando como referencia si el gas entra o no en contacto con el sólido respectivamente. Por otra parte, acorde a la dirección del flujo de gas respecto a la del sólido, el horno se considera a contracorriente si las direcciones de flujo y material son opuestas, o paralelo si se desplazan en la misma dirección [56].

Secador de tubos por vapor: Cámara de calentamiento indirecto que posee en su interior un arreglo de tubos encargados de transportar vapor, y por ende calentar y secar el material [57], como se muestra en la Figura 21.

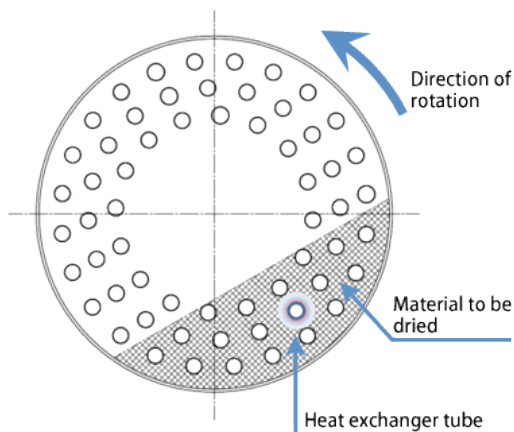


Figura 21. Arreglo de tubos en el secado por vapor [57]

Dicho sólido se transporta en la cámara por medio de un tornillo de Arquímedes, y el secado es controlado por la temperatura del vapor (manipulando la presión) y el tiempo de residencia [57]. Un modelo conceptual se presenta en la Figura 22.



Figura 22. Modelo conceptual del secador de tubos por vapor [57]

4.4.4 Principales especificaciones técnicas de los secadores rotativos

A la hora de dar selección a un tipo de secador industrial, se deben tener en cuenta múltiples parámetros de operación para obtener un montaje óptimo. De tal forma que, a la hora de elegir un secador se deben considerar las siguientes variables (Las cuales fueron tomadas de un proveedor ubicado en China) [58]:

- Dimensiones generales del producto, con la finalidad de dimensionar el espacio destinado a la maquinaria [m].

- Capacidad de producción, la cual define si la máquina puede suplir la demanda del material acorde a la materia prima que ingrese al proceso [kg/h].
- Régimen de giro, debido a que, acorde a las revoluciones que tenga el sistema, el material permanece más o menos tiempo durante el proceso de secado, es decir, afecta el tiempo de residencia en el horno, y a su vez, la humedad de salida del sólido [RPM].
- Potencia del motor, dado que requiere conocerse la eficiencia del sistema y si este suple la necesidad energética para dar movimiento a las cargas [kW]. En paralelo, se requiere conocer el voltaje de operación del sistema en cuanto a temas de acondicionamiento [V].
- Potencia específica, define la potencia requerida por kilogramo de sólido introducido en el proceso [kW/kg].
- Consumo específico, Energía que requiere secar un kilogramo de sólido [kWh/kg]
- Ángulo del tambor, para determinar la influencia de la gravedad en el material [°].
- Tipo de material y calentamiento, puesto que, si la industria a secar corresponde a la alimenticia, no se recomienda un calentamiento directo, por ello múltiples proveedores se encargan de especificar para qué tipo de materiales es diseñado el horno.
- Humedad primaria y final, en base a las condiciones de salida del material [%].
- Diámetro promedio del material a secar, para determinar si el material es capaz de fluir en el horno [mm].
- Espesor del material, con la finalidad de definir si el material puede ser secado en toda su geometría [mm].
- Flujo másico de aire caliente[kg/h].
- Temperatura del aire a la entrada [°C - K].
- Temperatura del material a la salida [°C - K].
- Flujo de másico del material a secar [kg/h].

4.4.5 Aplicaciones en procesos de secado industriales

Las funciones de los hornos de secado se basan en acortar el tiempo que conlleva la remoción de ciertos fluidos, comúnmente agua expresado en humedad, resinas, pinturas, recubrimientos, entre otros; además, contribuye a brindar mejoría a las propiedades físicas de los materiales. Entre las aplicaciones más conocidas se encuentran [59]:

- Secado y curado de pintura, puesto que se acortan los tiempos del proceso.
- Secado de piezas, debido a que múltiples materiales requieren de un pretratamiento térmico, el cual es utilizado para remover grasas, líquidos y agentes anticorrosión que generalmente se insertan en las cavidades más profundas de una pieza durante los procesos de inmersión o aspersión de químicos. Adquiriendo las dimensiones adecuadas para el ensamble.
- Secado de materias primas, dado que en ocasiones se tiene materias primas tales como polvos alimenticios, plástico para inyección, arcillas, entre otros; con cierta cantidad de humedad. Esta se encarga de producir defectos en procesos posteriores por lo que debe ser removida.
- Descontaminación, pues existen productos importados como madera y tela, que pueden portar plagas tales como larvas o insectos, motivo por el cual el material debe ser sometido a procesos térmicos con la finalidad de evitar riesgos biológicos.

La Tabla 3 se encarga de presentar algunos procesos donde se utilizan los hornos de secado industrial.

Tabla 3. Aplicaciones industriales de hornos de secado [60]

Sector industrial	Proceso	Temperatura de operación [°C]	Tipos de forma de secado	Consumo específico [kWh/kg]
Papelero	Fabricación de pasta, concentrado y papel	100-130	Conducción, convección radiación y evaporadores	0.1-13.9
Alimenticio	Preparación de azúcar, leche, cereales, torrajes, entre otros.	60-900	Convección, evaporadores, atomizadores, cristalizadores, hornos rotativos	2.3-17.4
Textil	Secado de telas	80-140	Continuos, intermitentes por convección forzada o conducción	13.9-40.6
Cemento	Cocción	100-450	Hornos de cocción con secciones de secado por convección forzada y directa	11.6-13.9
Materiales de construcción	Cerámica y refractarios	80-120	Varios	10.4-13.9
Electrometalurgia	Fabricación de alúmina, electrodos para hornos de arco, ferroaleaciones.	75-1000	Varios	2.3-10.4
Minería	Operaciones extractivas y de preparación el mineral	Máximo 100	Varios	10.4-11.6

4.5 Modelos numéricos para la simulación de fenómenos radiantes

Para entender acerca de los modelos radiativos, inicialmente se debe considerar un rayo incidente atravesando un medio no transparente con espesor ds , como se muestra en la Figura 23, [61]:

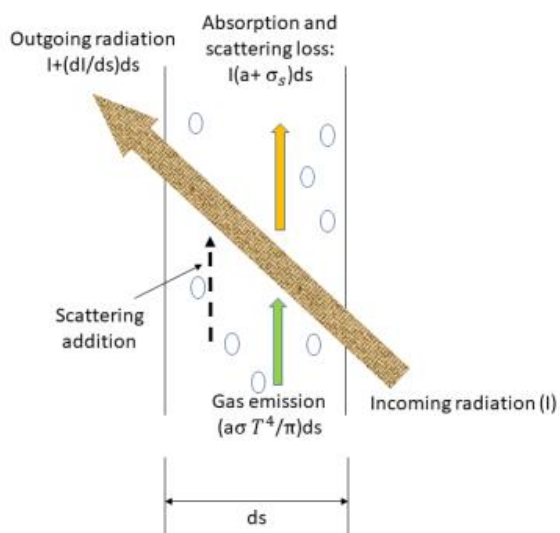


Figura 23. Modelado de transferencia de calor radiativo

Al realizar un balance de energía en el sistema presentado en la Figura 23 se tiene que:

- Una fracción de energía es absorbida por el gas (I_a)
- Otra fracción de energía se dispersa (I_s), siendo dependiente de un coeficiente de dispersión (σ_s)
- La radiación comienza a emitir en el sistema dependiendo del índice de refracción del medio y la absorptividad (I_e).
- El medio comienza a dispersar radiación alrededor de tal forma que afecta el rayo incidente (I_{so}), siendo función del ángulo sólido.

Expresándose dicho balance en la ecuación (24):

$$I + I_A + I_s + I_E + I_{so} = I + dI \quad (24)$$

$$I_A(\vec{r}, \vec{s}) = -\alpha I(\vec{r}, \vec{s}) ds$$

$$I_s(\vec{r}, \vec{s}) = -\sigma_s I(\vec{r}, \vec{s}) ds$$

$$I_{so}(\vec{r}, \vec{s}) = \left(\frac{\sigma}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \right) ds$$

$$I_E(\vec{r}, \vec{s}) = n^2 \alpha \frac{\sigma}{\pi} T^4 ds$$

Finalmente, realizando la respectiva simplificación del balance de energía, se obtiene la ecuación (25) conocida como la ecuación de transporte radiativa (RTE).

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (\alpha + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = n^2 \alpha \frac{\sigma}{\pi} T^4 + \frac{\sigma}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (25)$$

Donde:

- I : Intensidad de radiación [W]
- \vec{r} : Posición del rayo incidente [m]
- \vec{s} : Dirección del rayo incidente [°]
- α : Coeficiente de absorción [-]
- σ_s : Coeficiente de dispersión [-]
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann [W/m² K]
- n : Índice de refracción del medio [-]
- \vec{s}' : Dirección del haz de radiación dispersado [°]
- $\vec{\Omega}'$: Ángulo sólido del haz de radiación [sr]
- ϕ : Función de fase

De la RTE se derivan múltiples consideraciones que simplifican la ecuación, debido a que la transferencia de calor se ocasiona desde diferentes fenómenos, es decir, no es únicamente por radiación y tampoco unidimensional, se han desarrollado una serie de métodos que simplifican la obtención de soluciones prácticas en la simulación de procesos radiantes [62].

El método zonal, es utilizado cuando se presentan gases radiantes [63]. Este método considera subdividir el sistema en áreas y volúmenes (denominados "zonas") de forma isotérmica y define ciertos factores de

intercambio directo para gas-gas, gas-superficie y superficie-superficie. Con los anteriores factores se hace alcanzable descubrir el factor de intercambio total para un par de zonas, y lograr llevar a cabo el balance de energía para cada una de éstas. No obstante, este método manifiesta mayores dificultades para ajustarlo con las ecuaciones de flujo y energía resueltas utilizando técnicas tales como las diferencias finitas en los códigos CFD [64]. Además, para geometrías avanzadas no es posible calcular los factores de intercambio directo [42], [43], [65].

Existe otro método que se utiliza llamado el Monte Carlo, este se diferencia al anterior por ser un método estadístico, basado en la probabilidad del camino que puede seguir un “haz” discreto de energía hasta el contacto con el sistema. En la emisión de cada fotón se elige una dirección aleatoria [63]. Dado el anterior desarrollo, este método puede ser una opción para utilizarlo en geometrías complejas, pero sus soluciones presentan variaciones debido a los errores estadísticos y al difícil acoplamiento con las ecuaciones de flujo, aunque se han visto resultados acertados en sistemas cerrados multidireccionales y en hornos [65], [66]; aunque no se puede emplear en códigos CFD [64].

Otras metodologías para modelar la solución a los problemas radiativos, se conocen como los métodos del Flux, con los cuales se obtienen muy buenos resultados y no son tan difíciles para acoplarse a los códigos CFD [64]. Estos modelos tienen como referencia el uso de ciertas simplificaciones para el cambio de la intensidad de radiación sin importar el punto en base al ángulo. Algunos de estos son: Los modelos de four-flux y el de six-flux, los cuales admiten fundamentalmente un plano paralelo a la radiación para cada dirección. Los modelos de tipo Schuster-Schwarzschild realizan una subdivisión al ángulo sólido en ángulos menores en los cuales se acepta la intensidad uniforme. Otros modelos se fundamentan en el concepto de esferas armónicas, que propagan la intensidad local de esta forma, truncándolas en N términos. Estos son llamados modelos P – N, denotando N el orden de la aproximación [66]. Nótese que los modelos P-1 y P-3 son los más empleados por su cercanía con los resultados experimentales [67].

También existe el método de las ordenadas discretas (DOM -Discrete Ordinates Method-) [68], el cual se fundamenta en una aproximación discreta de la dependencia direccional de la radiación en el interior de las subdivisiones angulares, combinando el método de los volúmenes finitos y asumiendo que la magnitud de la intensidad de radiación permanece constante en cada dirección discreta, no obstante la ecuación de transferencia se utiliza para cada volumen de control y sobre cada ángulo en el que es discretizado. Consecuentemente, se subdivide otro modelo híbrido conocido como transferencias discretas (DTRM - Discrete Transfer Method-) [69], el cual combina el modelo zonal, Monte Carlo y Flux. Este modelo ha sido muy bien acogido principalmente en cámaras de combustión por su sencillez al acoplarse a los modelos CFD [70], [68].

Nota: Si se desea profundizar más acerca de los modelos radiativos, se puede ampliar la información en [63], [65], [71], [72], [73]; así mismo se pueden detallar sus ventajas y desventajas [74]. También, es importante destacar que, a grandes rasgos el DTRM y el DOM manifiestan mejor comportamiento para espesores ópticos delgados, en tanto el P-1 es más utilizado para espesores ópticos gruesos, teniendo en cuenta que en este último cabe la posibilidad de presentar problemas para fuentes localizadas [68], [75], además el DTRM podría subir el costo computacional comparado con los otros dos.

**Entiéndase por espesor óptico como la profundidad de la longitud de un material semitransparente para atenuar la radiación térmica.*

4.5.1 Simplificación de los modelos para propiedades radiantes

Para solucionar las ecuaciones de radiación, es necesario reconocer las propiedades radiativas y su acople con los métodos numéricos necesarios. En el momento que se posee radiación y convección, se dificulta la solución debido a la existencia de más términos en cada ecuación. Así mismo, los cuerpos generalmente poseen un comportamiento espectral a la radiación, debido a esto se modelan las propiedades de acuerdo a dicha consideración. Algunos de los modelos utilizados para brindar una aproximación a la solución son [65], [76], [77]:

- Line-by-line: Ejecuta un cálculo numérico espectral para todos los componentes radiantes de un sistema considerando la transición energética de los niveles cuánticos de las moléculas de gas [77]. Este modelo requiere discretizaciones finas de la región infrarroja, es decir alrededor de 10^6 subdivisiones, además para altas temperaturas se requieren bases de datos para el comportamiento de la interacción [76], motivo por el cual el modelo poco práctico.
- Modelos de bandas: El espectro se divide en bandas, las cualidades radiativas se promedian y calculan según el espectro de absorción junto a las propiedades del sistema. A su vez dicho modelo correlaciona los siguientes: El modelo estadístico de bandas estrechas (SNB-Statistical Narrow Band-), el correlacionado-k (CK -correlated k-), el correlacionado-k de gases ficticios (CKFG -correlated k fictitious gases-) y el modelo exponencial de banda ancha (EWB -Exponential Wide Band-).
- Modelos totales: Buscan predecir la intensidad de radiación total en el espectro. Entre estos se encuentran los datos que involucran la emitancia total como el de suma ponderada de gases grises (WSGG -WeightedSum of the Gray Gases- [65]) y el no-homogéneos de transmitancia total (TTHH -Total Transmittance non-Homogeneous-). El modelo WSGG presenta aproximaciones muy acercadas al resultado experimental, sin embargo, se restringen a la influencia en particular de los compuestos de mayor número de participantes como el CO₂ y el H₂O, por lo anterior presentan problemas para espesores ópticos muy pequeños o demasiado grandes, pues presenta problemas de indeterminación del comportamiento espectral del agua [76].

Cabe resaltar que el problema fundamental de los modelos de bandas es el encaje con las ecuaciones de transferencia de calor por radiación, y por consiguiente con los códigos CFD, entre tanto el WSGG se ajusta fácilmente con los modelos numéricos tales como el DOM y el P-1. Para esto, el modelo del grupo espectral (SG) se muestra como una opción para implicar el EWB, debido a que este computa los coeficientes de gases grises que se muestran en WSGG, conservando la ecuación de transferencia de radiación sobre los intervalos espectrales fijados; aunque esto exige un tiempo de cálculo mayor [76].

5. Estudio del comportamiento de arcilla ante el calentamiento por radiación infrarroja

5.1 Acerca de la arcilla

La composición de la arcilla se encuentra definida por un conjunto de silicatos aluminicos hidratados, algunos compuestos con magnesio o hierro y a su vez sustituyendo al aluminio de forma total o parcial [78]. Debido a su alta abundancia, existe un gran potencial para las nuevas tecnologías de combustión para la industria cerámica [79]. Esto se debe que este tipo de compuestos arcillosos absorben calor en el infrarrojo y teniendo a su vez coeficientes de absorptividad entre 0.302 y 0.4, incrementándose la tasa de secado de forma proporcional a la absorptividad [80].

Para realizar el estudio del calentamiento de arcilla por radiación infrarroja, la empresa SUMICOL se encarga de suministrar el tipo de arcilla que se va a trabajar. Dicha empresa cuenta con 23 minas y una capacidad de 1'500.000 toneladas al año en los 8 centros de procesamiento y plantas de beneficio abarcando todo el país, lo que se traduce en una reserva de aproximadamente 20 años [81].

La sede ubicada en el municipio de Sabaneta, Antioquia. Procesa alrededor de 45 tipos de arcillas, de los cuales se destacan 4 tipos:

- Amalia.
- Yeso.
- Unión tipo I
- Unión tipo II

Por selección de la empresa se realiza la caracterización de la arcilla Unión tipo I. La cual fue sometida a la prueba de XRF en el laboratorio de espectrometría ubicado en la universidad de Antioquia sede principal con la finalidad de obtener la composición química de dicha arcilla. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4:

Tabla 4. Composición química de la arcilla

Resultados			
Óxidos	%p/p	Óxidos	%p/p
Al ₂ O ₃	42.44	Cr ₂ O ₃	0.0177
SiO ₂	39.00	NiO	0.0122
TiO ₂	1.580	CuO	0.0095
Fe ₂ O ₃	0.705	La ₂ O ₃	0.0069
K ₂ O	0.135	WO ₃	0.0055
BaO	0.0934	MnO	0.0042
Fosforo (P)	0.0908	ZnO	0.0040
ZrO ₂	0.0579	PbO	0.0037
V ₂ O ₅	0.0509	Nb ₂ O ₅	0.0016
Ag ₂ O	0.0447	SrO	0.0013
CaO	0.0411	LOI	15.690

Basados en el estado del arte se tiene que la composición química corresponde al tipo de arcilla denominada caolín [82], [83]. La cual, acorde a la literatura y diferentes bases de datos posee las siguientes propiedades físicas, químicas, ópticas y radiantes [37], [82], [83], [84], [85], [86]:

Tabla 5. Propiedades radiantes del caolín

Propiedades radiantes del caolín			
Propiedad	Temperatura [K]	Valor [-]	Referencia
Absortividad	-	0.352	[86]
Transmitancia	-	0.3	[83]
Emisividad	1200	0.57	[37]
	1400	0.47	
	1600	0.53	
Conductividad térmica	723	0.256 W/m-K	[87]

Tabla 6. Propiedades físicas, químicas y ópticas de la arcilla [82]

Names: kaolin - classified, beneficiated, calcinated, aluminum silicate, calcinated silicate, china clay, soft kaolin, hydrated aluminum silicate, kaolinite		CAS #: 66402-68-4
Chemical formula: Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ ·2H ₂ O	Functionality: OH, silane modification	
Chemical composition: SiO ₂ - 38.5-63%, Al ₂ O ₃ - 23-44.5%, Fe ₂ O ₃ - 0.2-1%, TiO ₂ - 0.2-1.9%, K ₂ O - 0.8-1%		
Trace elements: Pb, As		
PHYSICAL PROPERTIES		
Density, g/cm³: 2.58-2.62, 2.5-2.63 (calcinated)		
Mohs hardness: 2, calcinated 4-8	Melting point, °C: 1800	
Loss on ignition, %: 12.1-14.2, 0.23 (calcinated)		Specific heat, kJ/kg · K: 4
CHEMICAL PROPERTIES		
Moisture content, %: 1-2 (up to 7%), slurry 20-30%		pH of water suspension: 3.5-11
OPTICAL & ELECTRICAL PROPERTIES		
Refractive index: 1.56-1.62 (calcinated 1.62)		Whiteness: 88-91
Color: white, cream; L* - 95.04-95.70, a* - 0.11-0.30, b* - 5.25-6.4		Dielectric constant: 1.3-2.6
Brightness: 69-90 (classified), 85-91 (beneficiated), 84-95 (calcinated)		
MORPHOLOGY		
Particle shape: platy	Crystal structure: hexagonal	Particle size, μm: 0.2-7.3
Oil absorption, g/100 g: 27-48 (classified), 50-60 (beneficiated), 45-120 (calcinated)		
Sieve analysis: 325 mesh residue - 0.01-2		Specific surface area, m²/g: 8-65
Hegman fineness: 3-7		

5.2 Equipos de medición

5.2.1 Radiómetro

Instrumento encargado de detectar y medir la intensidad de energía térmica irradiada en una zona, especialmente en el espectro infrarrojo [88]. HAND-HELD HEAT FLUX INDICATOR MODEL H-203 se encarga de determinar el flux de calor al utilizar una lectura digital directa de un solo canal en unidades de flujo de calor para transductores lineales. El indicador se programa de forma rápida en el panel frontal para que coincida el flujo de acuerdo con el sensor utilizado, de igual forma puede ser programado para otros sensores en cualquier momento simplemente cambiando la configuración del dial, este se muestra en la Figura 24.



Figura 24. Indicador H-203

El sensor utilizado para la medición es tipo Schmidt-Boelter modelo 64P-1-22 Pamir electronics Exton, Pa. Este sensor mide la densidad de flujo por medio de un conjunto de termopares interconectados en serie denominados termopila, los cuales generan una diferencia de potencial proporcional al flujo, como se muestra en la Figura 25; posee un alcance de 150° motivo por el cual en ocasiones se inhibe la visión de este por medio de un restrictor con la finalidad de analizar el flujo que emite un punto específico. También, debido a la alta y constante exposición al calor, este sensor requiere de enfriamiento por agua o exponerse al calor en pequeños intervalos de tiempo. Además, de acuerdo con el fabricante presenta un cambio de 1 W/cm² por cada 12.96 mV.

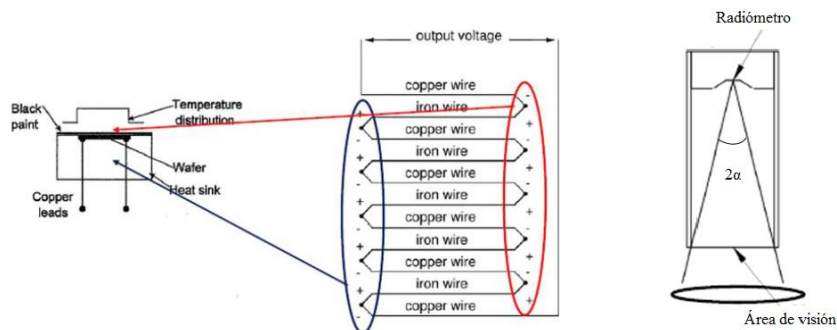


Figura 25. Funcionamiento del radiómetro [89]

Para hacer uso del restrictor y determinar el flux de calor, se debe realizar la medición con este inhibidor en contacto a la superficie, el cual consta de un cilindro cuyas paredes internas son negras y dependiendo de la apertura, este reduce su alcance de 150° a un área de visión característica del elemento, como se presenta en la Figura 25, dicha área es dependiente del ángulo de visión (α) [90]. Ahora, con la lectura obtenida del radiómetro se debe corregir el flux resultante por el restrictor, haciendo uso de las ecuaciones (26) y (27). El restrictor posee un ángulo de visión de 4° y un radio de superficie de 4 mm.

$$G = \frac{1}{2} \left[S - \sqrt{S^2 - 4 \left(\frac{r_j}{\tan(\alpha) L} \right)^2} \right] \left(\frac{\tan(\alpha) L}{r_j^2} \right)^2 E \quad (26)$$

$$S = 1 + \frac{L^2 + r_j^2}{\tan^2(\alpha) L^2} \quad (27)$$

Donde:

r_j : Radio de la superficie del radiómetro [m]

E : Intensidad de radiación medida [kW/m^2]

L : Distancia del radiómetro a la superficie de medición [m]. En este caso se aplica la longitud del restrictor

α : Ángulo de visión del radiómetro [$^\circ$]

G : Intensidad de radiación real [kW/m^2]

5.2.2 Túnel de secado

Espacio destinado para separar pequeñas cantidades de agua (u otro líquido, aunque comúnmente hace referencia al agua) de un sólido con el fin de reducir su contenido de humedad [91], todo lo anterior por medio de un flujo forzado el cual se genera por un ventilador. Para el montaje se utiliza un ventilador STURTEVANT SILENTVANE FAN estilo W50140 acoplado a un motor SIEMENS de 1.2 hp, el cual se presenta en la Figura 26.



Figura 26. STURTEVANT SILENTVANE FAN STYLE W50140 [92]

El túnel de secado normalmente se elabora en acero inoxidable y con gran capacidad de soportar peso, en este se monitorean las variables como la humedad relativa, temperatura, flujo, entre otras. Siendo la convección el medio por el cual se genera un flux de masa con el aire que circula dentro de él. Un esquema del túnel de secado se detalla en la Figura 27.

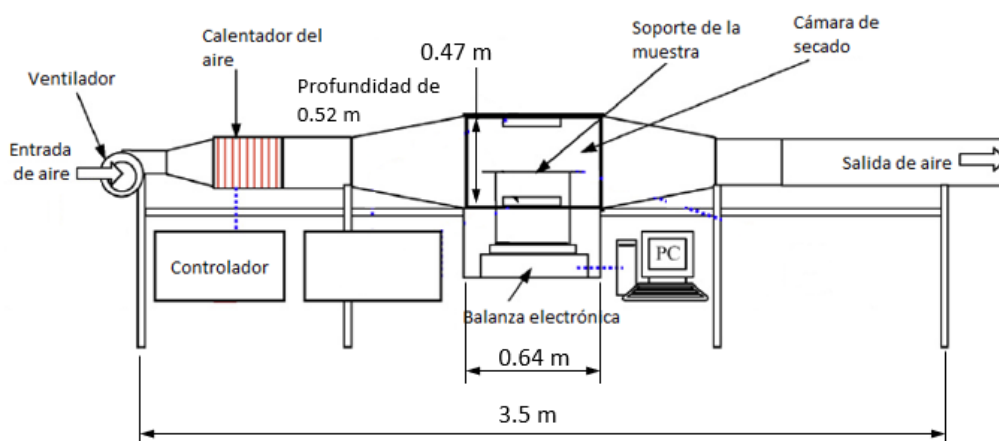


Figura 27. Esquema de un túnel de secado [1]

5.2.3 Sensor de temperatura

Dispositivos encargados de indicar la temperatura de un sistema por medio de ciertos materiales conductores o semiconductores, los cuales tienen la capacidad de cambiar la resistencia eléctrica en función de la temperatura del ambiente [93], clasificándose en termistor, RTD y termopares [94]:

- Los termistores son todos aquellos materiales semiconductores que aumentan la resistencia con la temperatura de forma directa (Tipo PTC), o su vez, cuando una aumenta la otra decrece (NTC).
- El sensor RTD (resistance temperature detector) hace alusión a los materiales conductores que varían su resistencia de forma proporcional a la temperatura.
- Los sensores termopares también llamados termocuplas, permiten transformar directamente el calor en electricidad, o bien disminuir la temperatura cuando se aplica una corriente eléctrica.

La Figura 28 describe el comportamiento de la resistencia de los anteriores sensores descritos con respecto a la temperatura [93].

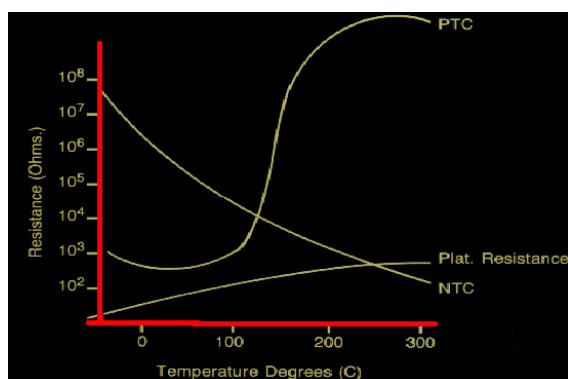


Figura 28. Comportamiento de los sensores de temperatura [93]

El sensor utilizado en el montaje para hallar la emisividad es un termopar tipo K con un indicador CHY 806A MULTILOGGER THERMOMETER, mostrado en la Figura 29. Para el monitoreo de la temperatura del aire en el túnel de secado se utiliza un sensor RTD HX94AC & HX94AV el cual mide la humedad relativa y la temperatura del aire con una resistencia de referencia de 100 Ohms y capacidad desde 0 a 100°C [95]. Este se presenta en la Figura 30.



Figura 29. Indicador CHY 806A MULTILOGGER THERMOMETER



Figura 30. Sensor de temperatura y humedad HX94AC

5.2.4 Lámparas infrarrojas

Lámparas enfocadas en la generación de ondas electromagnéticas principalmente en el espectro infrarrojo. Esta radiación es producida por el filamento caliente, ya que este cambia los estados de energía de los electrones orbitales en los átomos o en los estados vibracionales y rotacionales de los enlaces moleculares, es decir, generando vibración en los átomos por la energía y por ende expresándose en forma de calor [96]. Para las curvas de secado por radiación infrarroja, se hace uso de 2 bombillas infrarrojas SEKURO de 250W cada una, este tipo de bombillas se muestran en la Figura 31.



Figura 31. Lámpara infrarroja

5.2.5 Anemómetro

Instrumento utilizado para medir la velocidad instantánea del aire que fluye, existen múltiples tipos de anemómetros los cuales varían su principio de medición [97]. Entre estos se tienen los de compresión, rotación, hilo térmico, registrador gráfico, ultrasónico, de lámina, entre otros. En el laboratorio de operaciones unitarias se tiene un anemómetro de rotación CHY 361 [98], el cual alcanza mediciones de velocidad hasta 30 m/s con una resolución de 0.01 m/s, además de medir la temperatura del flujo con un rango entre -20 y 60 °C. Su principio de funcionamiento se basa en un conjunto de hélices unidos a un eje central provocando un efecto de giro el cual es proporcional a la velocidad del viento; dicho giro genera pulsos eléctricos los cuales son cuantificables y por lo tanto pueden ser traducidos a la velocidad de entrada [99]. La Figura 32 presenta el anemómetro utilizado para la caracterización.



Figura 32. Anemómetro CHY361 [98]

5.2.6 Celda de carga

Equipo utilizado para determinar el peso de un elemento por medio de un material (piezoeléctrico) encargado de convertir una fuerza aplicada en una señal eléctrica proporcional a la deformación resultante de este [100]. En el proceso de secado se utiliza para monitorear la pérdida de humedad por medio de la disminución del peso; así, la celda de carga VECTOR tipo S (S/N 5AX979) es la utilizada en el montaje, esta cuenta con una capacidad máxima de 3 kg y una resolución de +/- 1 g, esta se presenta en la Figura 33.



Figura 33. Celda de carga VECTOR.

5.2.7 Cámara termográfica

Cámara que muestra en pantalla una imagen de la radiación emitida por una superficie. Esta dispone de un sensor térmico que al recibir radiación infrarroja se calienta y cambia su resistencia eléctrica, este cambio de resistencia se compara a una determinada temperatura, siendo asignado un color para cada pixel y formando una imagen colorida para cada punto de temperatura. Para la medición de emisividad y el cálculo de absorptividad, se utiliza una cámara termográfica TESTO 890, la cual se muestra en la Figura 34.



Figura 34. Cámara termográfica TESTO 885

5.3 Montaje

Aunque la teoría dictamina que se requiere de una diferencia de concentración entre el medio arcilloso y el aire para que haya secado [44]. Existen múltiples referencias que suportan la mejoría del efecto de la radiación infrarroja en el secado de frutos tales como piñas o manzanas, a tal punto de disminuir los tiempos de secado $2/3$ partes del tiempo de secado por convección pura [1], [2]. Por otra parte, en otros estudios de secado de caolín, se ha evaluado la extracción de humedad por convección, convección-microondas (CV/MW) y convección-radiación (CV/R) [3]. Donde se encontró que las tasas de secado en el montaje CV/R es mayor que los demás sistemas propuestos, además, el sólido presenta temperaturas por encima de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de los demás montajes. También, evalúan la calidad por medio de la formación de esfuerzos debido a la contracción que se genera en el material al secarse, obteniéndose que, el secado CV/MW brinda la mejor calidad en el producto seco. Cabe anexar que, la aplicación es la encargada de definir si la cantidad de esfuerzos generados afectan el producto final.

En el presente trabajo se realizan pruebas de secado por convección a la arcilla con la finalidad de comparar y corroborar el efecto de la radiación infrarroja en el proceso. El túnel de secado a utilizar se encuentra en el laboratorio de operaciones unitarias, perteneciente al departamento de Ingeniería Química de la universidad de Antioquia y para tener las mismas condiciones, se realiza un rediseño del mismo soporte dentro del túnel de secado que utilice elementos que generen radiación infrarroja, tales como bombillos infrarrojos. El esquema del montaje convectivo se presenta en la Figura 35.

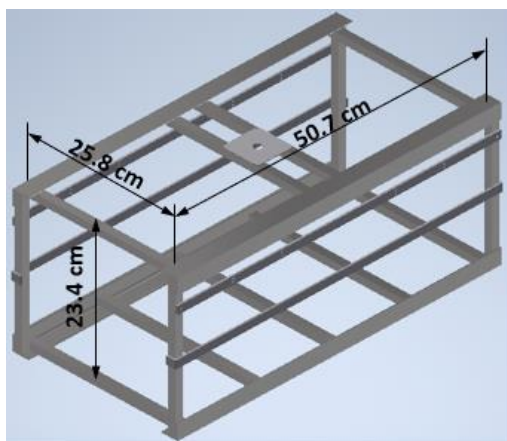


Figura 35. Montaje del soporte convectivo

5.3.1 Rediseño

Debido a la locación, los elementos infrarrojos deben elevarse de tal forma que no intervengan en convección o conducción con la muestra, por lo que se presenta un prototipo de soporte en la etapa superior del montaje, mostrado en la Figura 36.

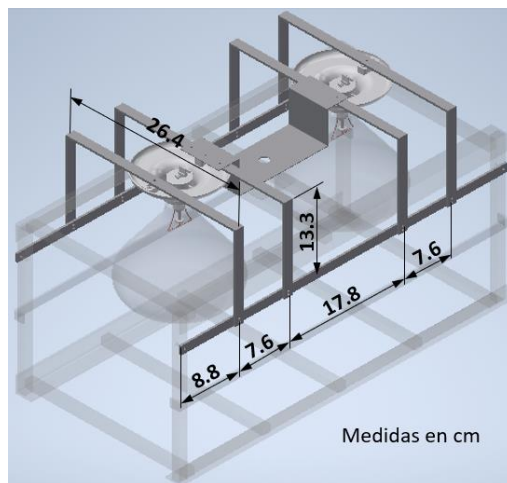


Figura 36. Rediseño del soporte.

El material de las varillas de soporte seleccionado es el acero estructural 1010 debido a que las cargas a las cuales va a estar sometido son bajas, además, el material es de uso común y económico. Para el soporte central se utiliza una lámina de acero inoxidable 430 con 1 mm de espesor porque esta pieza se encuentra sometida a mayores cargas y a su vez es la más crítica. Las características de los materiales se muestran en la Tabla 7 [101].

Tabla 7. Características de los aceros utilizados en el montaje

Acero AISI 1010		Acero inoxidable 430	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Densidad	7.87 g/cm ³	Densidad	7.8 g/cm ³
Resistencia última	365 MPa	Resistencia última	517 MPa
Resistencia a la tracción	305 MPa	Resistencia a la tracción	345 MPa
Módulo elástico	205 GPa	Módulo elástico	200 GPa
Relación de Poissons	0.29	Relación de Poissons	0.29

El perfil de las varillas a utilizar será el mismo que poseen las demás en el soporte inicial, el cual se presenta en la Figura 37.

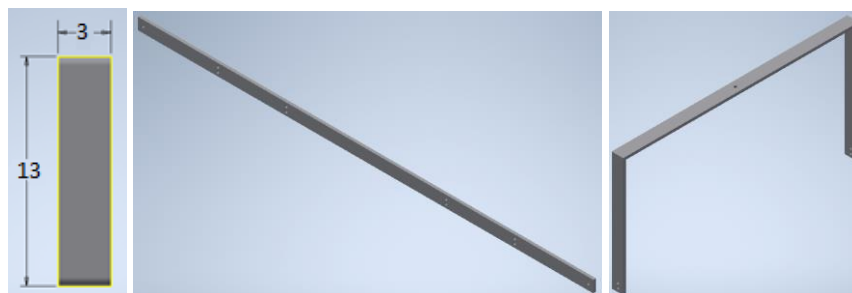


Figura 37. Perfil del soporte

Para verificar que el soporte resiste las cargas, se hace uso del software ANSYS 19 con el módulo de estático estructural en el cual se simulan las cargas y apoyos de la geometría.

En cuanto al soporte doblado en U, los bombillos junto al plafón poseen una masa de aproximadamente 1 kg, esto se traduce a una carga de 10 N y los apoyos impiden la traslación en los diferentes ejes con rotación en el eje longitudinal, encontrándose ubicados en los laterales. Por otra parte, para las varillas alargadas, las cargas se trasladan en los agujeros a lo largo de su longitud y los apoyos se encuentran en sus extremos. Así, las condiciones de montaje de ambas barras presentan en la Figura 38:

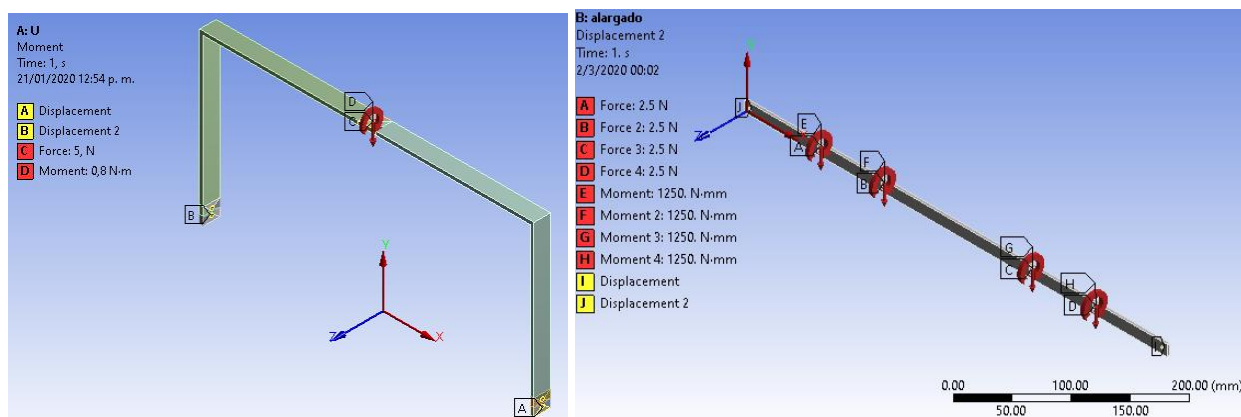


Figura 38. Condiciones de operación de las barras

De acuerdo a la Figura 39 y Figura 40, se puede observar que las deformaciones resultantes en el material se aproximan a 0.17 mm cerca al agujero central y 0.26 mm en la barra, lo que es despreciable para el presente sistema.

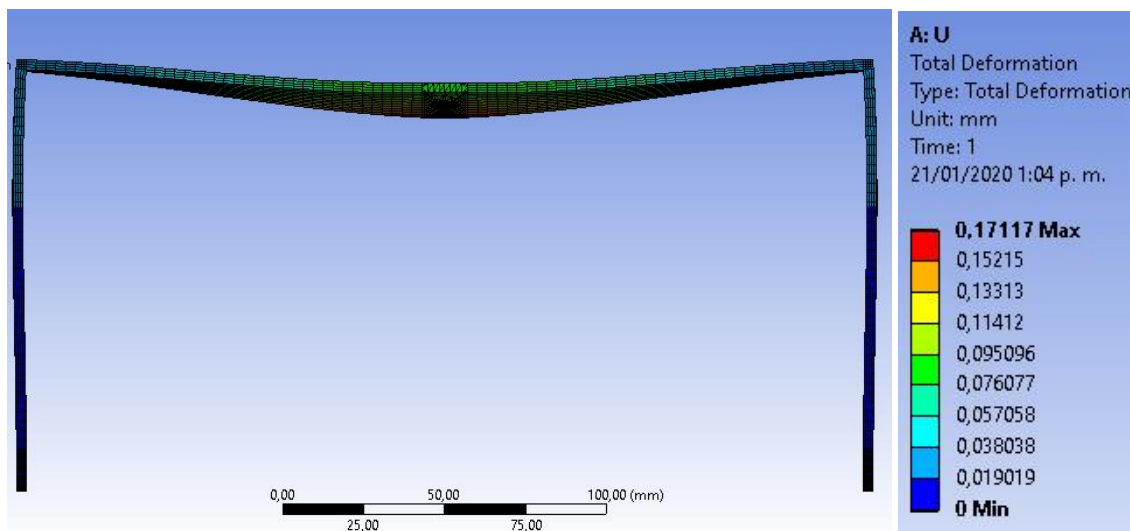


Figura 39. Deformaciones resultantes de las barras en U

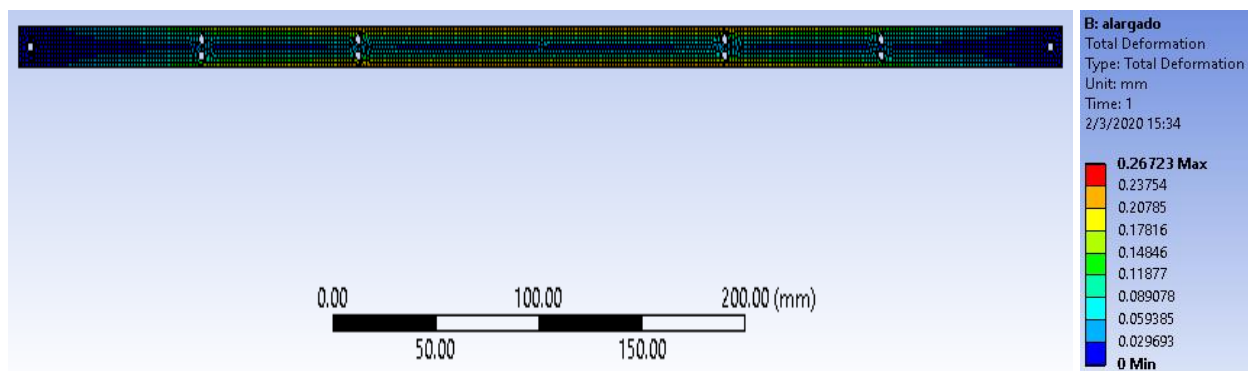


Figura 40. Deformaciones en la barra alargada

Se seleccionan tornillos de diámetro de 1/8" siendo estos de uso común, evaluándose la condición más crítica donde el tornillo recibe más cargas, el cual fue hallado en la simulación de elementos finitos de las barras y se ubica en el extremo de las barras alargadas, como se muestra en la Figura 41.

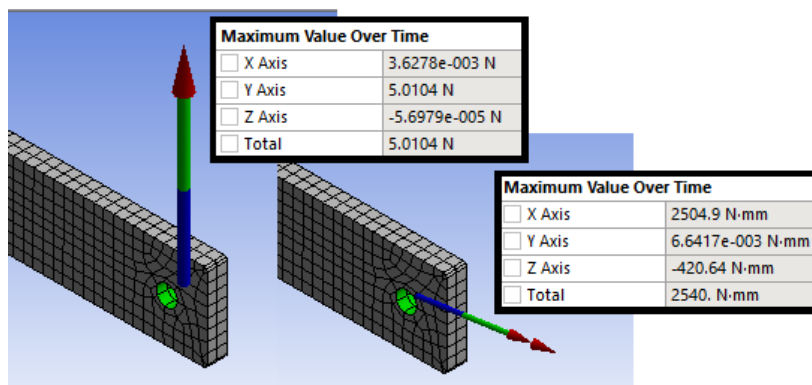


Figura 41. Reacción más crítica del soporte

Así mismo, las Figura 42 y Figura 43 muestran las condiciones de simulación y los resultados de las deformaciones totales, respectivamente:

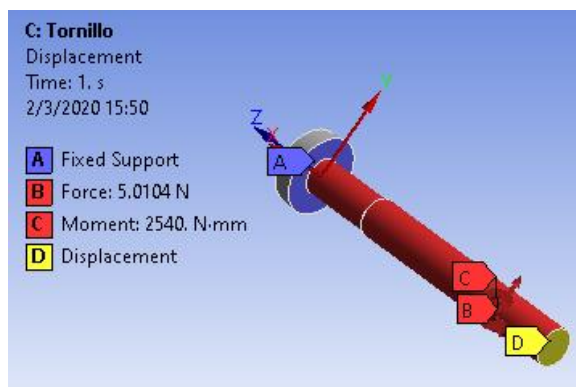


Figura 42. Condiciones de operación del tornillo

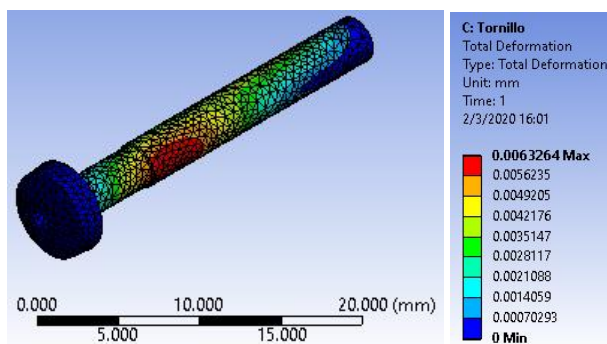


Figura 43. Deformaciones en el tornillo

Nota: Comúnmente estos tornillos también son de acero de bajo carbono, por lo que se trabaja con las mismas propiedades de las varillas del soporte.

En cuanto al soporte de acero inoxidable, se consideran las cargas totales de 10 N a cada extremo de las uniones de tornillos, como se muestra en la Figura 44

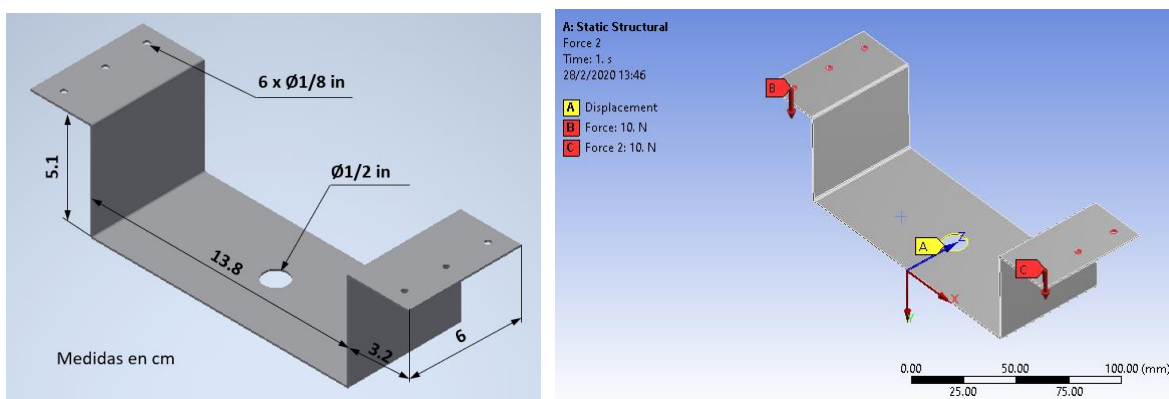


Figura 44. Soporte del sistema radiativo

Los resultados obtenidos de elementos finitos muestran que los esfuerzos obtenidos corresponden a un valor menor al esfuerzo de fluencia del material, expresándose con un factor de seguridad mayor a 1, siendo 1.67 el valor más crítico pero aceptado para el montaje. La Figura 45 expresa el comportamiento del factor de seguridad para la pieza.

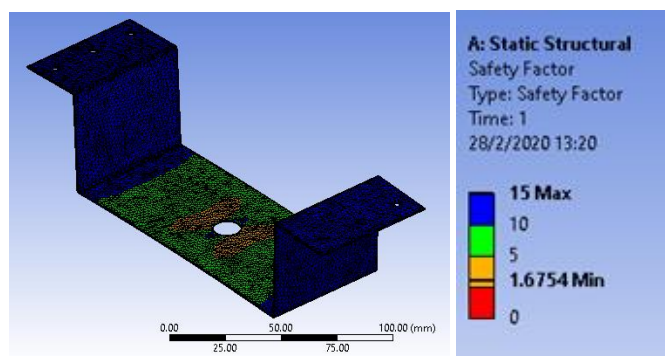


Figura 45. Factor de seguridad del soporte base

Finalmente, el rediseño de la parte superior del montaje en operación se muestra en la Figura 46.

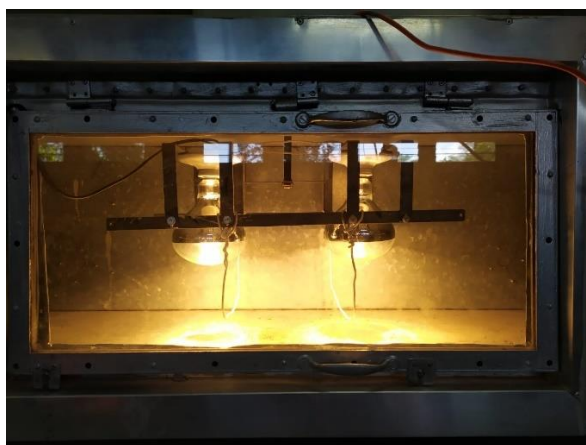


Figura 46. Rediseño superior del soporte

5.3.2 Montaje híbrido

Una vez rediseñado el soporte, se realiza el montaje en el túnel de secado por convección, siendo ahora un sistema híbrido de secado por radiación infrarroja y convección forzada, como se muestra en la Figura 47. Monitoreado en la entrada de aire con un sensor de temperatura, una balanza electrónica para la muestra, anemómetro para el flujo de aire y un radiómetro para determinar la radiación que llega en ciertos puntos de la superficie.



Figura 47. A) Túnel de secado por convección, B) Túnel de secado híbrido

El cableado utilizado en el sistema es tipo dúplex 12, el cual soporta la energía transmitida y una temperatura máxima de 60 °C.

5.4 Normatividad para el tratamiento de muestras

En cuanto a la normativa del tratamiento de las muestras, esta se regula por diferentes reglas dependiendo de la fuente de calor, del tipo de secado o así mismo, de la masa de las probetas. Para el presente trabajo, primordialmente se toman en cuenta las siguientes:

- ASTM-D2216-19 (Principalmente)
- ASTM-D4959

De la primera norma, se toma el tratamiento del tamaño de la muestra, el cual es dependiente del tamaño del grano como se observa en la Tabla 8.

Tabla 8. Requerimientos para el experimento acorde a la norma ASTM-D2216

TABLE 1 Minimum Requirements for Mass of Test Specimens, and Balance Readability^A

Maximum Particle Size (100 % Passing)		Method A Water Content Recorded to ±1 %		Method B Water Content Recorded to ±0.1 %	
Sieve Size	Alternative Sieve Size	Minimum Specimen Mass	Balance Readability (g)	Minimum Specimen Mass (g)	Balance Readability (g)
75.0 mm	3 in.	5 kg	10	50 kg	10
37.5 mm	1-½ in.	1 kg	10	10 kg	10
19.0 mm	¾ in.	250 g	0.1	2.5 kg	0.1
9.5 mm	¾ in.	50 g	0.1	500 g	0.1
4.75 mm	No. 4			100 g	0.01
2.00 mm	No. 10			20 g	0.01

De forma arbitraria se toman muestras de 100 g para cada experimento. Por lo tanto, se requieren tamices No 4, los cuales fueron gestionados en el laboratorio de mineralurgia del bloque 18 de la universidad de Antioquia.

La segunda norma enunciada hace alusión al esquema de etiquetado de las muestras, el cual dictamina que las muestras sometidas al secado deben tener los siguientes ítems en su clasificación (Algunos fueron omitidos debido a que el carácter del estudio es académico y no industrial):

- Nombre del proyecto
- Masa del contenedor, g (M_c)
- Masa del contenedor y muestra húmeda, g (M_1)
- Fecha y tiempo del calentamiento
- Masa del contenedor y muestra seca, g (M_2)
- Masa de agua, g ($M_w = M_1 - M_2$)
- Masa del sólido, g ($M_s = M_2 - M_c$)
- Contenido de agua, % ($w = \left(\frac{M_w}{M_s}\right) \times 100$)
- Tipo de fuente de calor utilizada

Nótese que acorde a ambas normas se considera material seco cuando la variación de la medición del peso corresponde ± 0.1 % al dato anterior.

5.5 Experimentos

Las pruebas que se realizan para la caracterización se dividen en:

- Medición experimental de la emisividad y su relación con la temperatura
- Cálculo de la absortividad en las diferentes etapas de secado
- Comparación de la influencia de la radiación en el secado por convección natural (Secado híbrido)

5.5.1 Medición experimental de la emisividad

Existen múltiples métodos para la medir la emisividad, los cuales se muestran a continuación:

- Método 1: Se toma una muestra de arcilla, la cual es calentada y por medio de un termómetro de contacto y una pistola pirométrica o cámara termográfica, se gradúa el valor de emisividad de la pistola hasta que la temperatura sea igual a la que muestre el termómetro de contacto [102]. Como

se ha visto anteriormente, la emisividad es dependiente de la temperatura por lo que se debe hacer un muestreo a diferentes temperaturas, como en este caso el proceso es para hornos secadores cuyas temperaturas de operación no exceden 90 °C, este será el valor máximo para evaluar tomando valores arbitrarios desde la temperatura ambiente y se analiza si la emisividad varía abruptamente con la temperatura o es despreciable. El esquema montaje se presenta en la Figura 48:

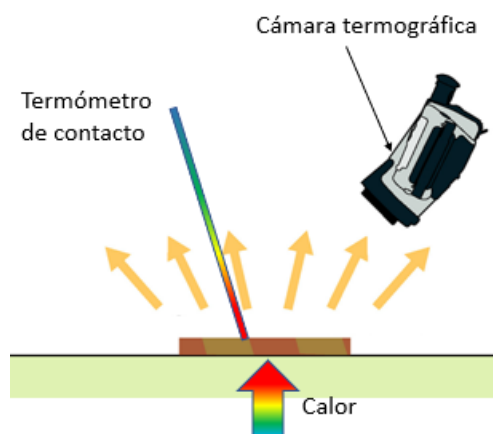


Figura 48. Experimento de medición de emisividad [102].

- Método 2: Para determinar la emisividad en este caso es necesario remontarse a su concepto, el cual se refiere a cuánto calor emite un cuerpo tomando como referencia el cuerpo negro. De tal manera que, el procedimiento implica calentar el sólido, consecuentemente el material emite calor en función del aumento de la temperatura, y en virtud de ello, se hace uso del radiómetro y el restrictor para caracterizar el flux emitido por la superficie del sólido (como este es aislado por el restrictor, no hay calor reflejado ni transmitido). Paralelamente, se mide la temperatura del sólido con un termómetro de contacto en la misma zona. Posteriormente, se realiza la relación del flux emitido en base al calor emitido por un cuerpo negro a la misma temperatura superficial registrada (σT^4), obteniéndose el valor de la emisividad. Un esquema de montaje se muestra en la Figura 49 [103]:

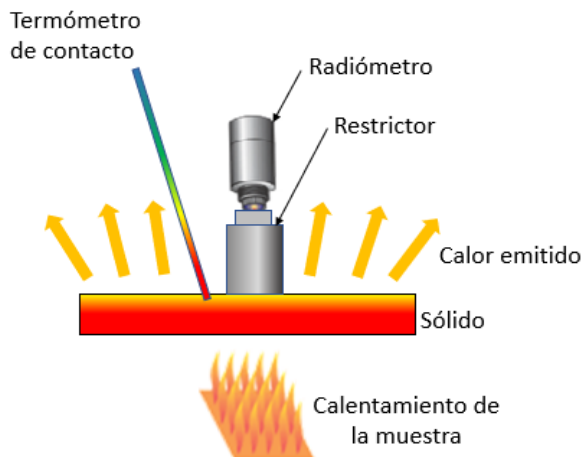


Figura 49. Experimento 2 de medición de emisividad [103]

Finalmente, el valor de emisividad se calcula con la ecuación (28), para cada temperatura.

$$\varepsilon = \frac{\text{Lectura del radiómetro}}{\sigma T_{medida}^4} \quad (28)$$

Nótese que el valor de la lectura debe ser corregido por el restrictor, presentado en las ecuaciones (26) y (27)

5.5.2 Cálculo de la absorptividad del material

Para determinar la absorptividad del material, se requiere conocer el calor absorbido por el material, para ello, es necesario remitirse a la curva de secado presentada en la Figura 16. Tomando como referencias las diferentes etapas de secado se realizan ciertas simplificaciones para cada etapa.

- En la etapa donde la tasa de secado es constante, todo el calor es absorbido por la humedad no ligada del sólido. Por tal motivo para esta sección:

$$q_{in} = h_{fg} * m_{H2O(V)} \quad (29)$$

Siendo:

q_{in} = Calor absorbido [kJ]

h_{fg} = Calor latente de vaporización del agua [kJ/kg]

$m_{H2O(V)}$ = Masa de agua evaporada [kg]

Tomándose m como el dato de entrada de las curvas de secado generadas las pruebas realizadas en el laboratorio de operaciones unitarias.

- En las secciones donde la tasa de secado decrece, el calor es absorbido como calor sensible por el sólido, la humedad y el calor latente de esta. El calor absorbido se modela como se muestra en la ecuación (30):

$$q_{in} = \int_{T_i}^{T_f} C_{p_{arcilla}} m_{arcilla} dT + \int_{T_i}^{T_f} C_{p_{H2O}} m_{H2O} dT + h_{fg} * m_{H2O(V)} \quad (30)$$

Siendo:

$$\int_{T_i}^{T_f} C_{p_{arcilla}} m_{arcilla} dT = \int_{T_i}^{T_f} \sum_{i=1}^N C_{p_i} m_i dT$$

Dando uso a los datos obtenidos de la proporción de cada componente de la prueba XRF, el C_p de la base de datos Knovel y T_f medido por medio de una cámara termográfica.

Nótese que se debe realizar la prueba de emisividad antes del secado, puesto que es requerido conocer la temperatura superficial por medio de una termografía en el experimento, para posteriormente determinar el valor del calor absorbido. Los datos de humedad son tomados de la misma curva de secado.

Una vez obtenido el calor absorbido por el compuesto, por medio de la definición de absorptividad se obtiene que:

$$\alpha = \frac{q_{in}}{Q_{rad}} \quad (31)$$

Para determinar el calor radiado a dicho punto se puede realizar de múltiples formas, con un modelo analítico que defina el factor de forma de la configuración, o utilizar el radiómetro y acomodarlo en el sistema a evaluar para determinar la radiación que llega al sólido de manera experimental, de igual forma, se puede realizar una simulación numérica para determinar el comportamiento de la radiación y así definir el factor de forma.

5.5.2.1 Factor de forma en la simulación numérica

Para la simulación numérica se toma el CAD del montaje presentado en la Figura 35, donde se genera el perfil 2D del soporte por medio del software INVENTOR 2020, obteniéndose el resultado en la Figura 50:

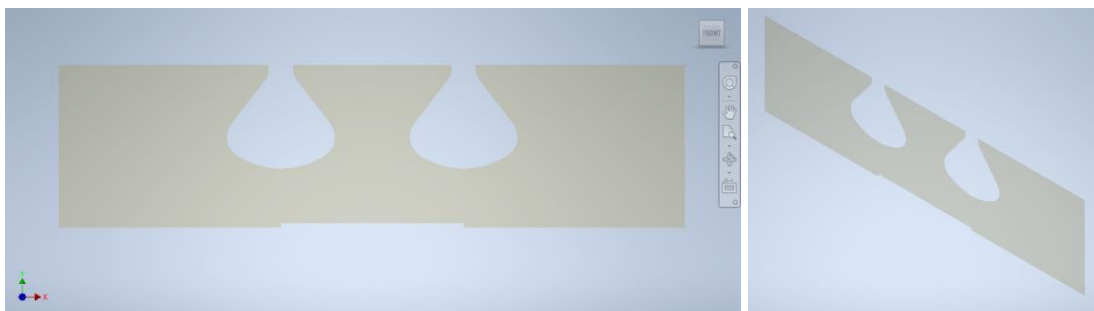


Figura 50. Perfil para simular

Ahora, procesando la imagen en ANSYS se obtiene una malla con 22553 nodos, aspecto ratio máximo de 4.2945, skewness de 0.6071 y ortogonal quality mínimo de 0.58026 por lo que el mallado se considera estructurado cumpliendo los criterios de calidad [104]. La Figura 51 presenta el mallado del sistema.

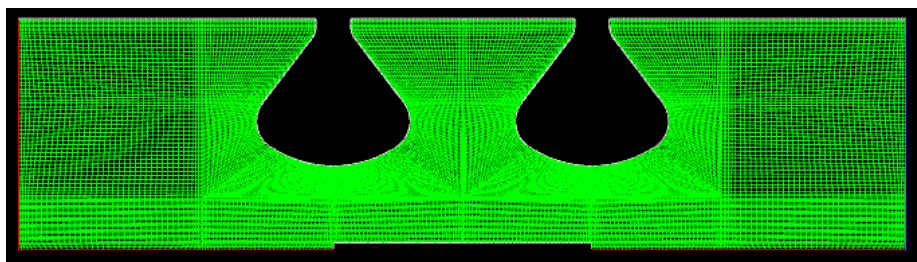


Figura 51. Mallado del sistema

En cuanto a las condiciones de frontera del sistema, se toma de la Figura 51:

- La pared derecha (Azul) como entrada del sistema.
- Pared izquierda y laterales inferiores (Rojo) como salidas del sistema ya que el montaje realmente se encuentra soportado sobre el suelo aproximadamente 6 cm.
- Las paredes superiores (Blancas) a temperatura ambiente.
- Las bombillas (Blancas) como emisoras del flux.
- El sólido como una pared no adiabática con pérdidas por convección bajas.

Los modelos considerados en la simulación son:

- La ecuación de energía debido a que el sistema se calienta.
- Radiación por ordenadas discretas (Por su discretización y consideración en la dirección de la radiación, dado que aplica para los sistemas radiantes utilizados).
- Viscoso (K-Omega SST), pues es el más usado para el comportamiento en túneles de secado o de viento [104].

La solución del comportamiento de la radiación desde los bombillos se presenta en la Figura 52, el flux emitido por la bombilla fue medido por medio del radiómetro.

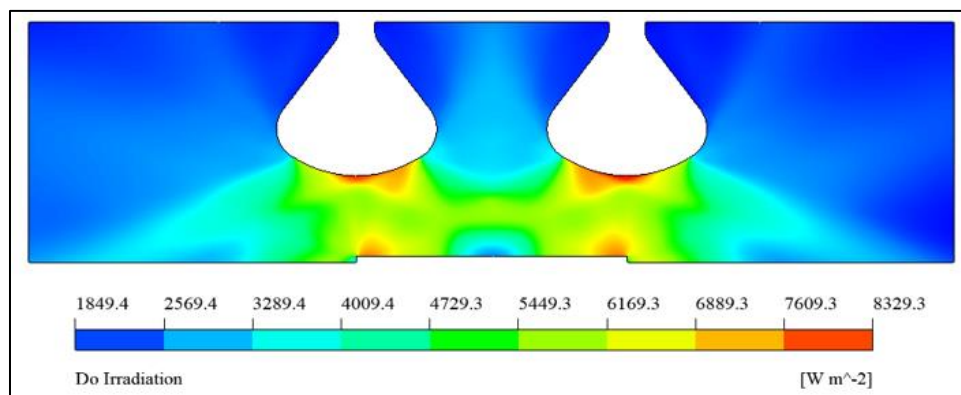


Figura 52. Comportamiento de la radiación

Finalmente, la radiación incidente en el sólido se define por la fracción del factor de forma presentado en el perfil de la Figura 53.

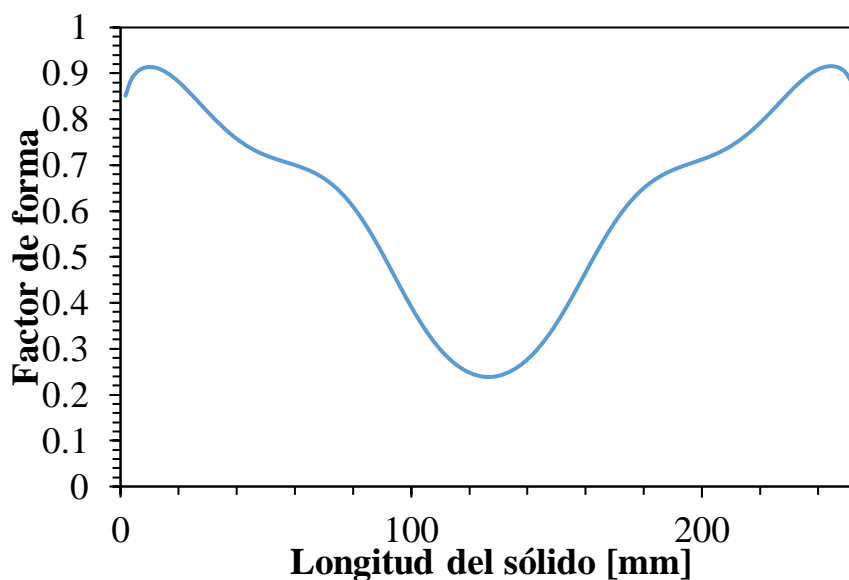


Figura 53. Fracción de la radiación incidente en el sólido

5.5.3 Comparación de la influencia de la radiación infrarroja en el secado

De la teoría de transferencia de masa, se espera que la curva de secado sea más pronunciada y a su vez más corto el tiempo de secado con la influencia de la radiación infrarroja [1], esto debido a que la temperatura superficial del sólido incrementa por la absorción de los rayos y esta a su vez afecta la temperatura promedio del sistema, aumentando así el coeficiente difusivo binario de la interfaz aire-agua de la siguiente forma:

- Por el término T^3 de la ecuación (18), el cual es proporcional
- Disminuyendo el valor de la integral de colisión, el cual decae con la temperatura crítica y esta a su vez es proporcional a la temperatura e inversamente proporcional al potencial de Lennard-Jones que depende de la naturaleza de la interfaz.
- Siendo el coeficiente binario netamente dependiente y proporcional a la temperatura y la intensidad de radiación como lo detallan múltiples autores en diferentes correlaciones [1].

En el montaje híbrido se propone realizar una prueba de referencia con los bombillos apagados, con la finalidad de evaluar los resultados bajo las mismas condiciones de flujo de aire. Por lo tanto, se realiza una curva de secado con convección forzada y posteriormente se realizan las pruebas de secado híbridas, variando así las condiciones de temperatura y velocidad del aire. El sistema utiliza 2 bombillas infrarrojas de 250 W cada una. En resumen, los arreglos y las condiciones de las pruebas a realizar se expresan en la Tabla 9.

Tabla 9. Experimentos en el túnel de secado

Prueba	Tipo de secado	V_aire_in [m/s]	T_aire_in [°C]	Hum_rel_aire_in [%]	Pot_emitida [W/ m ²]
1	Convección pura	1.5 ± 0.01	40 ± 0.1	28	-
2	Híbrido	1.5 ± 0.01	40 ± 0.1	28	6800
3	Híbrido	2 ± 0.01	40 ± 0.1	28	6800
4	Híbrido	1.5 ± 0.01	25 ± 0.1	65	6800
5	Radiación pura	-	25 ± 0.1	65	6800

Por cuestiones de tiempo, en el laboratorio sólo se pudo realizar un experimento para cada prueba. También, el sensor de humedad a la entrada del túnel no cumplía el correcto funcionamiento, motivo por el cual la humedad relativa de entrada se reporta acorde a la base del histórico del IDEAM para el día que se realizaron las pruebas a temperatura ambiente [105]. Con dicho dato se realiza el análisis acorde a la Figura 54 donde se conserva la humedad absoluta del espacio y por medio del software EES, se obtiene la humedad relativa a 40°C a la presión atmosférica de Medellín.

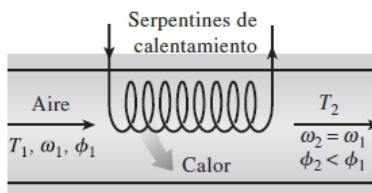


Figura 54. Calentamiento del aire del túnel [49]

Donde:

- T: Temperatura [°C]
- ω : Humedad absoluta [kg_{agua}/kg_{aire}]
- ϕ : Humedad relativa [%]

La anterior aproximación se puede aplicar, aunque esta genera incertidumbre con respecto a la variabilidad al interior del laboratorio.

5.6 Resultados y análisis de datos

5.6.1 Emisividad

Para la medición de la emisividad se realiza el método 1 descrito anteriormente; el experimento consta de una bandeja de acero con el material a secar y se procede a calentar siendo la fuente calefactora una resistencia de 1800W/120V marca HACEB modelo EM1L. Posteriormente, se realizan diferentes mediciones de temperatura con el termopar de contacto y se toman termografías para cada instante en el cual se mide la temperatura; para realizar dichas termografías se utiliza la cámara termográfica descrita en el ítem 5.2.7, luego se procesan las imágenes por medio del software TESTO IRSofT 3.6 con el cual se gradúa la emisividad de la superficie hasta que la temperatura media del sector al termopar sea igual a la del termómetro de contacto utilizado en la medición experimental como se muestra en la Figura 55 y Figura 56. El experimento utiliza una bandeja de acero en la cual se hacen mediciones desde la temperatura ambiente hasta 90 °C, presentándose así los datos resultantes en la Figura 57 siendo la emisividad promedio de 0.472.

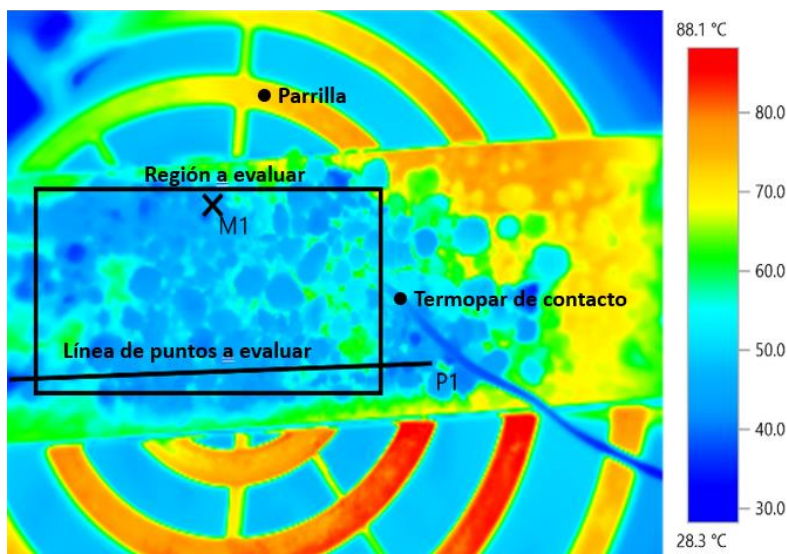


Figura 55. Montaje de calentamiento por cámara termográfica

Para realizar el procesamiento de datos, se toma una región a evaluar que sea representativa al color que se aproxima en la zona en la que se encuentra el termopar de contacto, tal como se muestra en la Figura 55. Luego a cada pixel de la termografía se asigna un color dependiendo de su temperatura para así evaluar el número de pixeles del área y se toma el porcentaje total de número de elementos del sistema, de tal manera que, se distribuye el porcentaje de elementos con su correspondiente temperatura y se grafican, obteniéndose una distribución normalizada de la zona, la cual se presenta en la Figura 56. Con el número de pixeles se determina el valor medio de temperatura de cada elemento y por medio del software anteriormente descrito, se gradúa la emisividad hasta que la temperatura media sea igual a la medida con el indicador del termopar.

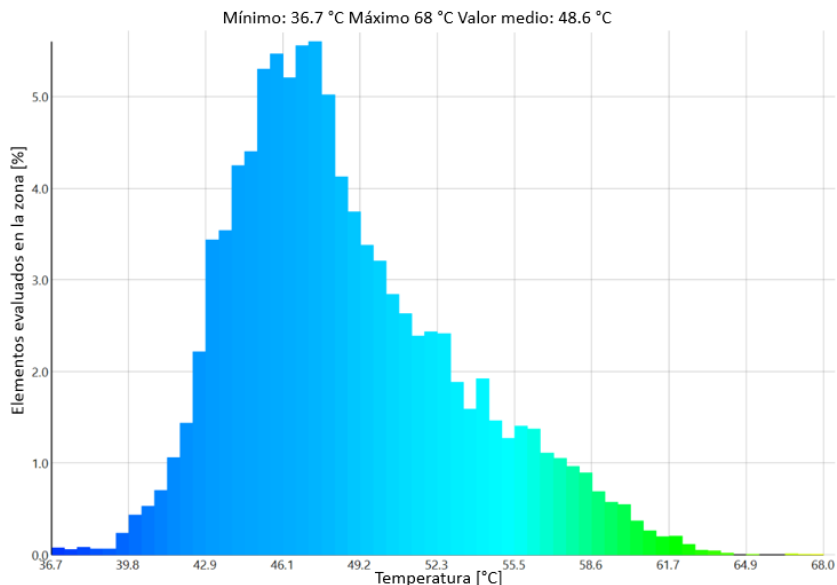


Figura 56. Distribución de temperaturas en el sector evaluado

Al procesar el conjunto de datos, se evaluaron 71 puntos aleatorios en la superficie del sólido con tendencias hacia el centro. Con los cuales se obtiene la gráfica presentada en la Figura 57.

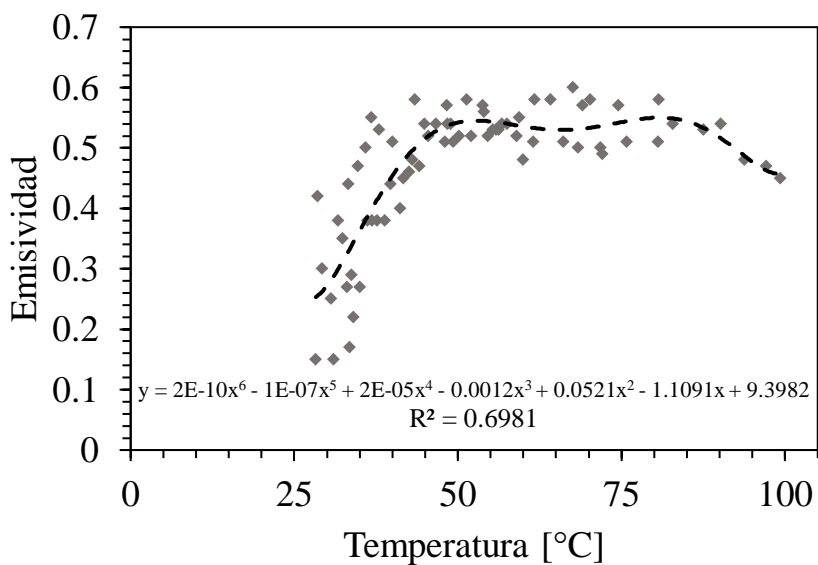


Figura 57. Emissividad vs Temperatura [°C]

La fiabilidad del coeficiente de relación múltiple (R) de la curva de emissividad, expresa la variación del dato teórico de la ecuación de tendencia con respecto al dato experimental. Este dato requiere ser corregido acorde al número de casos y variables independiente medidas [106]. Por lo tanto, a partir de la ecuación (32) se expresa dicho valor corregido.

$$R^2_{\text{corregida}} = R^2 - \left[\frac{p(1 - R^2)}{(n - p - 1)} \right] \quad (32)$$

Donde:

R: Coeficiente de relación múltiple

p: Número de variables independientes, en este caso corresponde a 1

n: Número de puntos evaluados

$$R^2_{\text{corregida}} = 0.6981 - \left[\frac{1 * (1 - 0.6981)}{(71 - 1 - 1)} \right] = 0.694$$

El valor obtenido denota que los puntos evaluados y la variable independiente brindan una fiabilidad del 69% respecto a la tendencia resultante, esto se debe a que existen puntos que al incrementar/disminuir un grado, la emisividad aumenta/disminuye 0.1 generando “saltos” en la gráfica, lo que disminuye el ajuste en la curva suavizada. De igual forma, muchos autores asumen por ley de Kirchhoff que el valor de emisividad se aproxima a la absorptividad del material [34], por tal razón el dato obtenido de emisividad de la arcilla caracterizada se encuentra en los datos comunes correspondientes y aproximados presentados en la literatura [37], [86]; motivo por el cual da veracidad a la curva obtenida en el experimento.

De la Figura 57 se puede observar que:

- La emisividad presenta una variación similar con la temperatura, como se muestra en la Figura 10 y la Figura 11, con una etapa de crecimiento abrupto desde el ambiente, hasta aproximadamente 38°C, lugar donde se aprecia un valor constante para el estudio fundamentado en el secado del material.
- Los puntos que se encuentran fuera del comportamiento en la gráfica de emisividad se atribuyen a múltiples causales, entre los cuales están:
 1. La temperatura reflejada de los alrededores, la cual afecta la medición de la cámara termográfica primordialmente a temperaturas cercanas al ambiente (Zona donde presenta más error).
 2. El área de muestreo seleccionada para determinar la emisividad, debido a que la muestra no presentaba calentamiento/enfriamiento homogéneo en toda la superficie y existen puntos más calientes en una misma medición, como se muestra en la Figura 55.
 3. El termómetro de contacto, pues este al tener tanta exposición con los alrededores puede generar errores en la medición de la temperatura y por ende la calibración de la emisividad.
- Dada la etapa constante de emisividad entre los 38 °C y 90 °C, se podría asumir como una función escalonada como se presenta en la Figura 11.
- Se aprecia un decaimiento en los valores de emisividad cuando alcanza temperaturas mayores de 100°C, aun así, se recomienda evaluar más puntos a dichas temperaturas para afirmarlo con certeza debido a que la Tabla 5 presenta valores similares de emisividad a temperaturas por encima de 800K. De igual modo, este fenómeno se atribuye a que la humedad contribuye a la absorción de calor, al superar los 100°C, el agua ebulle y en consecuencia disminuye dicha absorción, lo que con lleva a disminuir la emisividad (Si se considerase un sólido que cumple la ley de Kirchhoff).

5.6.2 Curvas de secado

Como motivo de comparación, las curvas de secado se normalizaron en la cantidad de masa inicial de la prueba durante un determinado tiempo, obteniéndose así los resultados en la Figura 58:

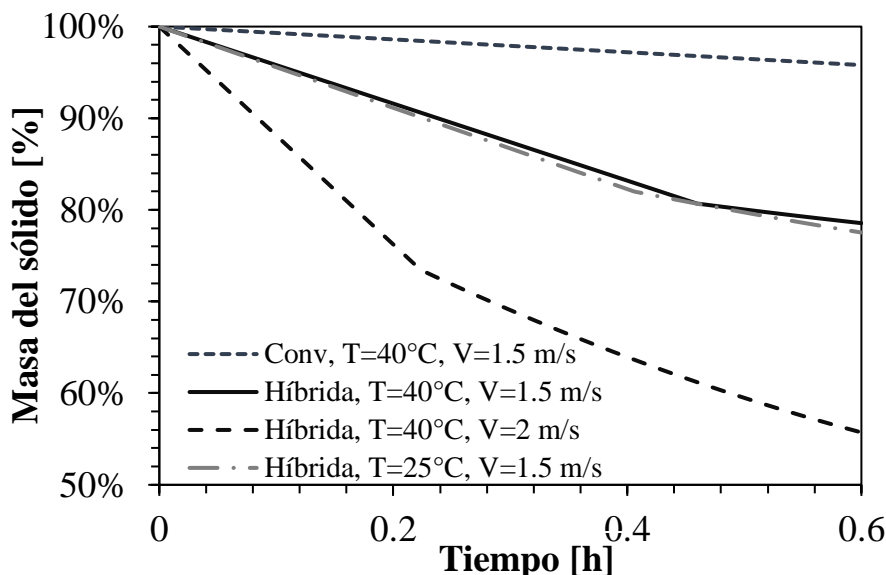


Figura 58. Curvas de secado de la arcilla a convección e híbrida

Se puede apreciar que:

- Las etapas de secado constante de cada prueba se maximizan conforme la velocidad del flujo incrementa, debido a que esta afecta el desarrollo de este y por ende el coeficiente de transferencia de calor convectivo del sistema aire-sólido, aunque el efecto se pronuncia a una magnitud mayor a 1.5m/s.
- Al tomar iguales condiciones de flujo, el efecto de la temperatura del aire de entrada no es muy acentuado respecto a la velocidad del aire o la intensidad de radiación. Esto se debe a que las propiedades del fluido no varían en demasía respecto a las temperaturas del experimento lo que conlleva a tener un Reynolds cuasi constante y un coeficiente de transferencia de calor invariable. Aun así, el experimento presenta que a temperatura más baja la tasa de secado es un poco mayor, lo anterior plantea generar un conjunto de experimentos para corroborar dicho efecto, pues, si todos los términos de la ecuación convectiva son similares, sólo priva el efecto de la diferencia de temperaturas, la cual es mayor con una temperatura de aire mayor y a su vez incrementa el coeficiente convectivo de transferencia de masa, caso contrario a los resultados obtenidos.
- El material pierde el 20 % de humedad en al menos 30 minutos al secarse de forma híbrida, por el contrario, el secado convectivo sólo 5 % en este intervalo de tiempo.
- La tasa de secado en el material expuesto aumenta con la exposición a la radiación infrarroja, al igual que en el secado de materiales orgánicos. La variación de la inclinación de la curva de secado respecto a los diferentes materiales [1], [2], [3]; se atribuye al arreglo utilizado en el túnel de secado de los diferentes experimentos, las condiciones de operación y la naturaleza misma del material.

- En las condiciones híbridas, la radiación afecta el coeficiente difusivo de transferencia de masa, de tal manera que incrementa el flux de masa en el sistema. Acorde a diferentes autores, el comportamiento de dicho flux es proporcional a la radiación emitida, la temperatura y la contracción volumétrica para brindar mayor exactitud [1]. Por lo tanto, al realizar la regresión lineal múltiple tomando como referencia la intensidad de radiación, la velocidad, la temperatura y descartando la contracción, se obtiene la expresión (33) con un ajuste del 63.8 % y un coeficiente de determinación del 85.5 %.

$$\dot{m} = 1.04 I - 0.32205 T + 4.66145 V - 7.62312 \quad (33)$$

Donde:

I: Flux de radiación [kW/m²]

T: Temperatura del aire [°C]

V: Velocidad del aire [m/s]

\dot{m} : Flux de masa [g/s m²]

De la ecuación (33), se infiere que:

- La intensidad de radiación influye proporcionalmente en el secado, requiriendo valores de 1 kW/m² para que afecte 1 g/s-m² el flux.
- La temperatura del aire es un factor que afecta el flujo de calor por el diagrama de resistencias, incrementando en menor proporción el flux de masa con deltas de temperaturas más altos. También, dicho dato permite inferir que la diferencia de concentraciones entre el gas y el sólido no influye de forma pronunciada en la tasa de secado dada la humedad relativa en las condiciones del aire, en otras palabras, el delta de concentración es requerido para que haya secado, pero no aumenta de forma pronunciada el flux al tener un gas más seco.
- La velocidad del aire presenta alta influencia en el secado, siendo este un resultado variado a la tendencia presentada en la literatura [1], [2]. Este fenómeno se atribuye a la naturaleza del material y a la magnitud de la velocidad, ya que en los estudios anunciados se evaluaron velocidades donde el flujo es menor al implementado en el presente trabajo, de tal manera que, probar velocidades mayores a 1.5 m/s en los elementos descritos de la literatura podría confirmar el peso que posee la variable, dado que el flujo podría generar turbulencia y por ende aumentar la transferencia de masa.

Al tomar el cambio de masa en el tiempo (La pendiente) de cada prueba se obtiene el flux de masa con sus respectivas humedades de salida, presentados en la Tabla 10.

Tabla 10. Flux de masa y humedad de salida de los experimentos

Prueba	Características	Flux de secado [g/s m ²]	Humedad relativa promedio del aire de remoción a la salida [%]
1	Conv, T=40°C, V=1.5 m/s	1.305	72.33
2	Híbrida, T=40°C, V=1.5 m/s	7.595	80.57
3	Híbrida, T=40°C, V=2 m/s	19.712	83.3
4	Híbrida, T=25°C, V=1.5 m/s	9.465	85

Nota: El área superficial del recipiente utilizado corresponde a 60 ± 1 mm x 252 ± 1 mm.

Cabe denotar que el flux de la prueba 1 corresponde al 6.6 % del flux de la prueba 3, lo que se traduce en tiempos de secado más cortos por el efecto combinado de la radiación y la convección. Además, en la Figura

58 no se encuentra la prueba 5 y las gráficas no expresan el punto hasta que el material se encuentra seco. Lo primero se explica debido a que la arcilla no perdió masa significativamente en el montaje de radiación pura, presentándose este resultado en la Figura 59. Lo segundo se justifica por el hecho de comparar de forma visual las pruebas con mayor y menor tiempo de secado total de la materia prima, lo cual se muestra en la Figura 63.

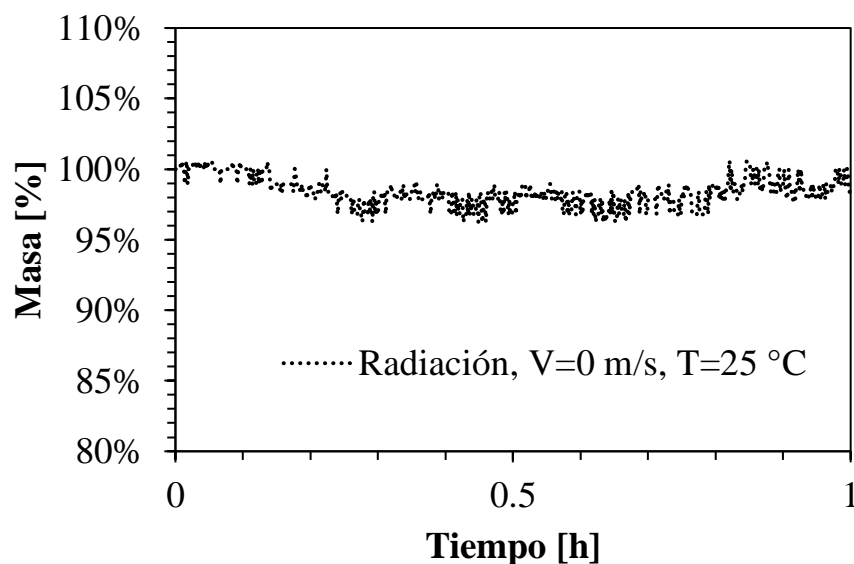


Figura 59. Variación de la masa en el tiempo al secar por radiación

De acuerdo a la Figura 59 el material posee una disminución de masa de aproximadamente 5% en un periodo de una hora sin presentar tendencias de disminución, aunque inicialmente el sólido empieza a perder masa al menos hasta las 0.3 h (18 minutos), posterior a este tiempo la masa se mantiene constante y esto se atribuye al sitio confinado, presentado en la Figura 46. Este fenómeno se debe a que el aire comienza a almacenar la humedad, pero al no haber un flujo de remoción que transporte la humedad al entorno, este se satura y por ende no hay secado. Para justificar lo anterior, se presenta en la Figura 61 el comportamiento en el tiempo de la humedad relativa del aire, en dicha gráfica se detalla un crecimiento pronunciado en la humedad desde un 85% hasta alcanzar un 94% al igual intervalo de tiempo donde el material no se secó, lo que permite confirmar la saturación por el confinamiento sin flujo de aire. También, la Figura 60 muestra que, al retirar el sólido del túnel de secado, internamente el material presenta el mismo tono de color que antes de entrar a la prueba. De tal manera que, para corregir el experimento y haya secado en radiación pura, se debe presentar un sistema abierto al ambiente con una humedad relativa menor al 85% aproximadamente, fundamentándose en la fenomenología de la convección natural del aire para remover el agua.



Figura 60. Muestra de arcilla al secarse por radiación pura

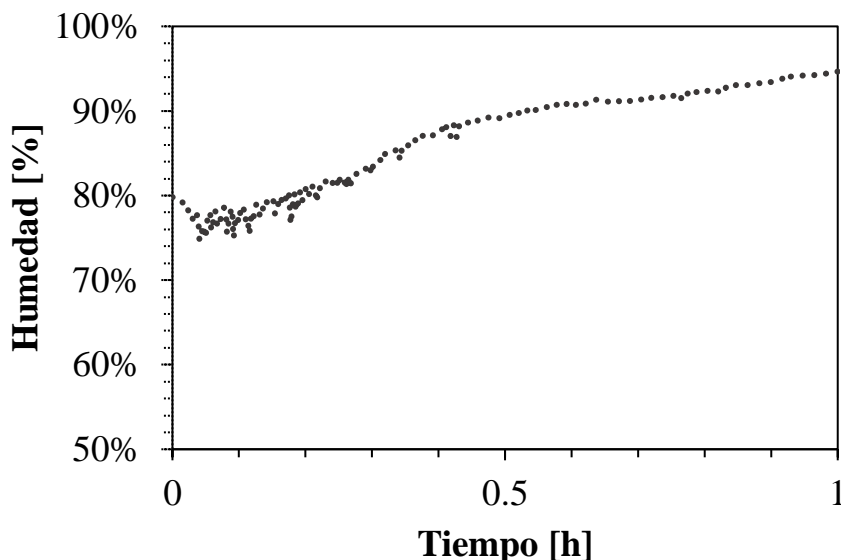


Figura 61. Humedad en el tiempo al secar por radiación

Para dar corrección al experimento de radiación pura, se plantea un sistema con una balanza electrónica con capacidad de conexión a computador para dar registro a la evolución de la masa del sistema. Como las balanzas normalmente poseen un display LCD, se debe aislar de la radiación infrarroja para evitar daños en esta, por tal motivo se recomienda una capa de manta cerámica recubierta con láminas de acero cuya función es evitar el contacto directo con el aislante debido a que se compone de fibra de vidrio y genera cortes en la piel. Por otra parte, se puede rediseñar unas bases para el soporte del experimento en el túnel de secado para generar el levantamiento de las bombillas. Un esquema del montaje 100% radiativo que mitiga la carencia de secado se presenta en la Figura 62. Si se desea realizar en el mismo túnel de secado se propone cortar una pared del túnel y poner extractores que lleven la humedad al entorno.

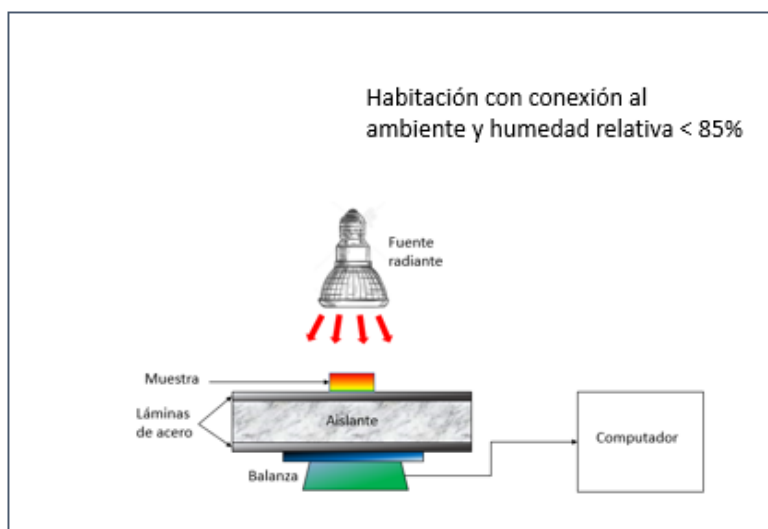


Figura 62. Esquema del nuevo montaje de radiación pura

Las pruebas de secado total del sólido se muestran en la Figura 63. Siendo la prueba híbrida con temperatura del aire a 40 °C y velocidad 2 m/s la utilizada para comparar el sistema por convección debido a que esta presentó el más alto flux de los experimentos realizados.

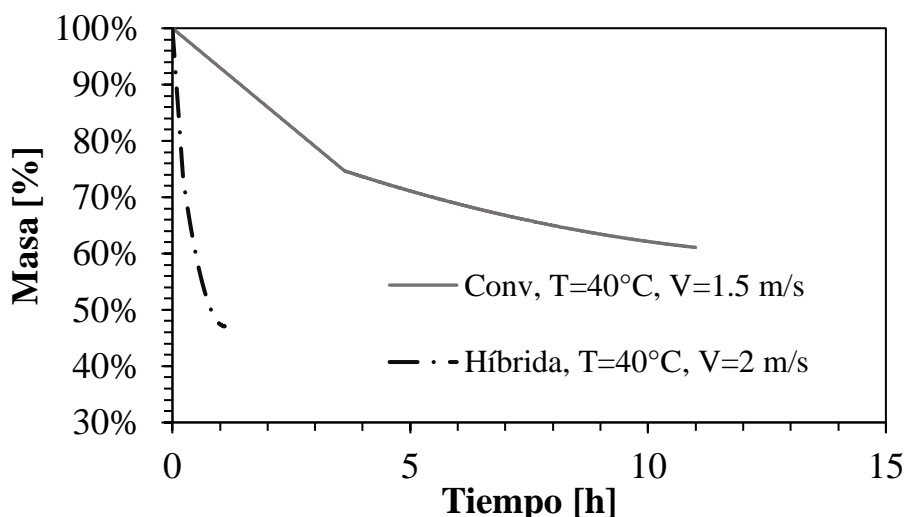


Figura 63. Curvas de secado por convección e híbrida

De la Figura 63 se resalta:

- La heterogeneidad en la composición de las arcillas, debido a que alcanzan el secado del material a diferente porcentaje de pérdida humedad, por tal razón se explica que el material de la prueba híbrida poseía más humedad que la prueba por convección. Aun así, esta seca más rápido por las razones anteriormente descritas. Cabe añadir que, este fenómeno explica la necesidad de analizar en rangos de composición para categorizar las arcillas [82].
- El secado híbrido con el mejor arreglo de propiedades en los presentes experimentos requiere aproximadamente el 9.09 % del tiempo que requiere el secado por convección para secar totalmente el material.

Como motivo de comparación, se realiza otra prueba aparte para evaluar 3 puntos en cuánto a la velocidad del aire ya que es la variable que posee más influencia en el secado híbrido, siendo este nuevo valor la mitad de la velocidad de referencia (1.5 m/s), obteniéndose así los resultados presentados en la Figura 64. (Los experimentos se realizan con una temperatura del aire de entrada a 40 °C).

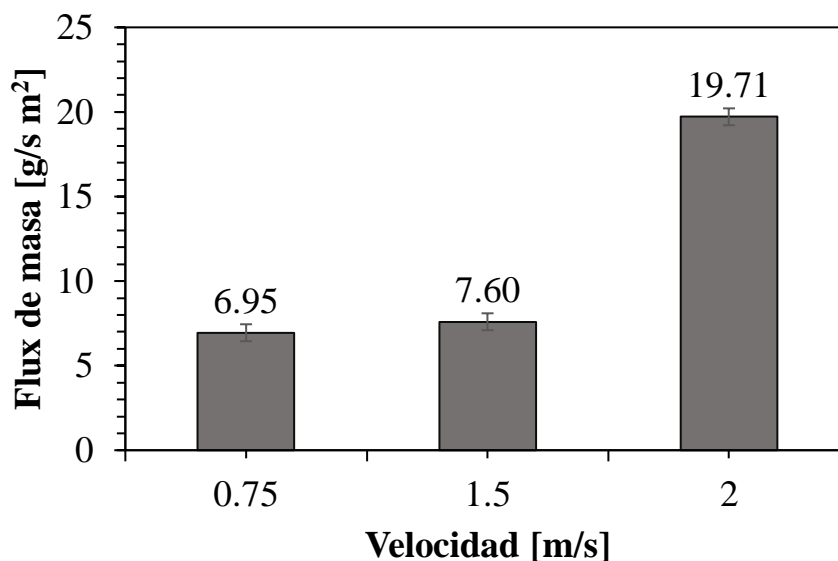


Figura 64. Flux de masa en función de la velocidad

Se alcanza a percibir que, a mayor velocidad de flujo, el flux de masa posee un crecimiento con tendencia de forma exponencial, esto debido a la turbulencia que se forma por el aumento del número de Reynolds y por ende la transferencia de calor en la superficie. También, aunque la prueba de secado por radiación, expuesto en la Figura 59, no presenta pérdida de masa por el espacio donde fue realizada, si se ejecuta el secado en un espacio amplio con bajas humedades relativas (Menor de 85 %) habría una tendencia de flux aproximadamente de 6 g/s m², el cual es 4.6 veces más alto que secar por convección. Cabe resaltar la influencia de la velocidad en el flux de secado y como difiere dicho análisis respecto al estado del arte, de tal manera que dicha diferencia se atribuye al desarrollo del flujo, dado que un flujo a mayor velocidad posee mayor turbulencia y en consecuencia mayor transferencia de calor, lo que implica aumento del coeficiente difusivo del sistema, finalmente, velocidades entre 0.5 y 1.5 m/s no desarrollan alta turbulencia y de modo que el efecto en el secado no se afecta fuertemente. Como se explicó anteriormente, realizar secado de los sólidos (de los artículos mencionados) a mayores magnitudes de velocidad, podría ser objeto de corroboración de la influencia de la variable.

5.6.3 Absortividad

Con las curvas de secado híbridas presentadas en la Figura 58, se toma la cantidad de masa evaporada en la etapa de secado constante con su respectivo tiempo, utilizando los resultados de las pruebas donde la magnitud de la velocidad posee menor influencia en el flux de masa; estas pruebas son la 2 y 4, y se expresan en la Tabla 11 (Se descarta la prueba 1 puesto que esta no utiliza radiación, la prueba 3 porque demuestra que a esta magnitud de velocidad si se afecta el flux, y la 5 porque dadas las condiciones del montaje no hubo secado).

Tomando la masa evaporada de las pruebas y promediando sus resultados, se obtiene la masa evaporada a evaluar (Nótese que es igual si se hicieran los cálculos por separado y se promedia la absortividad), multiplicándose por la entalpía de vaporización del agua (2257 kJ/kg a 25 °C [49]) se determina el calor absorbido durante este periodo de secado. Haciendo uso del flux irradiado de la bombilla (medido por el

radiómetro) se obtiene un valor de 3400 W/m²-bombilla y con el factor de forma de cada nodo obtenido de la simulación presentada en la Figura 53, se haya la radiación incidente para cada elemento, el procedimiento consiste en multiplicar el flux total de ambas bombillas con el factor de forma para cada punto obteniéndose el flux de cada elemento, posteriormente se promedia el resultado, el cual corresponde a 4221.74 W/m² con el cual se determina la absorptividad. En otras palabras, el factor de forma promedio obtenido del perfil de la simulación, corresponde a 0.621 y al multiplicarse por el flux total de entrada de las bombillas (6800 W/m²) se obtiene el valor obtenido a utilizar en la ecuación (28).

Tabla 11. Masa evaporada en la tasa de secado constante

Prueba	Híb, V=1.5 m/s, T=40 °C	Híb, V=1.5 m/s, T=25 °C	Promedio
Masa evaporada (g)	18.95	20.89325	19.921625
Tiempo (s)	1650	1460	1555

Así, para la etapa de secado constante se utiliza la ecuación (28):

$$\alpha_{cte} = \frac{1.28 \times 10^{-5} \frac{kg}{s} \times 2257 \frac{kJ}{kg}}{4221.74 \frac{W}{m^2} \times 0.252 m \times 0.06 m \times \frac{1 kW}{1000 W}} = 0.453$$

Para la absorptividad en la tasa de secado constante, cabe destacar que, el valor obtenido corresponde a un dato que posee alta aproximación con respecto al presentado en la literatura para el caolín [107]. La variación que esta tiene se atribuye al flujo de aire del túnel de secado que introduce/extrae energía del sistema, a la humedad misma que este dispone (Ya que no todos los caolines almacenan la misma humedad) y al calor por conducción que absorbe el soporte de la muestra. También, se resalta que la absorptividad es una propiedad intrínseca de los materiales acorde a las propiedades del rayo incidente, por lo que es independiente del régimen de secado, ya que, si la potencia se aumenta, el flux de masa aumenta y por lo tanto la relación de absorptividad se debe mantener.

Para la tasa de secado decreciente, se hace uso de la cámara termográfica, con la cual se identifica la temperatura superficial del sólido en la tasa de secado constante y la tasa de secado decreciente al culminar el proceso, como se muestra en la Figura 65. Con las curvas de secado anteriormente descritas se identifica la masa evaporada y con el radiómetro, la radiación incidente en la superficie; se compara con el perfil obtenido de la simulación en la Figura 53 y finalmente se calcula la absorptividad del material.

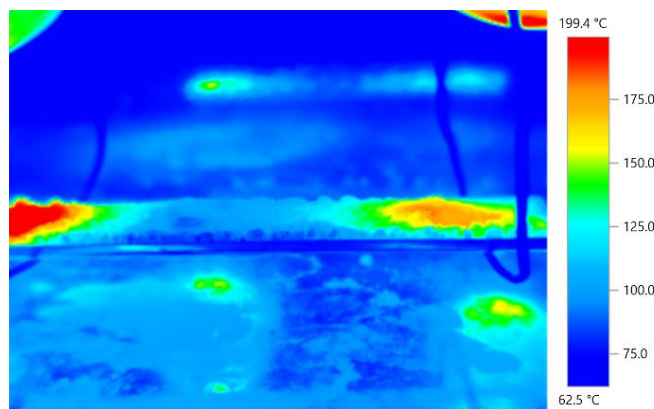


Figura 65. Termografía de la arcilla al secarse

Así, las temperaturas promedio de los análisis termográficos son 86 °C y 130 °C para el secado constante y secado decreciente respectivamente. La masa evaporada en la tasa de secado decreciente se expresa en la Tabla 12.

Tabla 12. Masa evaporada en la tasa de secado decreciente

Prueba	Hf b , V=1.5 m/s, T=40 °C	Hf b , V=1.5 m/s, T=25 °C
Masa evaporada (g)	7.743	16.034
Tiempo (s)	2840	3715

Para hallar el calor específico de cada componente de la arcilla presentada en la Tabla 4, se utiliza la base de datos Knovel para definir el polinomio que define Cp [108]. Los coeficientes utilizados para cada compuesto representativo de la arcilla (Mayor a 0.1 % en base al peso) se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Coeficientes del calor específico de los componentes representativos de la arcilla

Compuesto	Símbolo	Rango de temperatura [K]	Calor específico (a+bT+cT ² +dT ³ +eT ⁴ +fT ⁵ +gT ⁶)						
			a	b	c	d	e	f	g
Dióxido de silicio	SiO ₂	298-1500	21.27392	0.119262	-0.0002	2.29E-07	-1.72E-10	7.29E-14	-1.29E-17
Óxido de aluminio (Alúmina)	Al ₂ O ₃	100-1500	-4.84E+01	7.43E-01	-1.45E-03	1.57E-06	-9.58E-10	3.10E-13	-4.15E-17
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	100-950	-45.2233	0.972822	-2.35E-03	3.14E-06	-2.14E-09	6.26E-13	-3.08E-17
Óxido de titanio	TiO ₂	100-1500	-17.2747	0.453299	-1.01E-03	1.25E-06	-8.82E-10	3.33E-13	-5.21E-17
Óxido de potasio	K ₂ O	100-1500	28.2786	0.29647	-6.23E-04	7.50E-07	-5.22E-10	1.94E-13	-2.98E-17

La temperatura del polinomio se utiliza en Kelvin

Finalmente, Para la tasa de secado decreciente se halla la absorptividad haciendo uso de la ecuación (30).

$$\alpha_{dec} = \frac{\int_{T_i}^{T_f} \sum_{i=1}^N Cp_i m_i dT + h_{fg} * m_{H2O(V)}}{Q_{rad}} = 0.1385$$

Matemáticamente, la absorptividad disminuye en la etapa de secado decreciente debido al flujo de masa evaporada. Lo anterior a causa de que dicho término disminuye al aumentar el tiempo que se requiere para remover la humedad, lo que conlleva a un calor latente menor que predomina por encima del sensible correspondiente al sistema. Esta disminución se atribuye a que la humedad no es un componente transparente a la radiación infrarroja, por lo que contribuye a mayor absorción al haber más masa, recíprocamente en la etapa decreciente el sólido absorbe menos por la falta de humedad, y la baja absorción de cada componente del sólido.

Cabe anexar que, en cuanto al estado del arte, las propiedades radiantes del material se realizan con sólidos libres de humedad según la norma “ASTM E168-16. Standard Practices for General Techniques of Infrared Quantitative Analysis”. Por lo anterior, la absorptividad se puede hallar en medidas calorimétricas directas (o por esferas integradas, aunque es un método costoso y difícil de acondicionar por la sensibilidad del sistema [109], [110]), es decir, en función de la temperatura que alcanza el sólido y se hace uso de la ecuación (30), en diferencia que la energía incidente es generada por un láser, variando así la longitud de onda de este y expresando la absorptividad en un rango espectral con un sistema aislado, o realizando un

monitoreo de las pérdidas al exterior [111], [112]. Es de resaltar que, aunque el láser brinda mayor precisión en la energía incidente y brinda flexibilidad en el rango espectral infrarrojo, el método utilizado en el presente trabajo no se desvía de la teoría actual, en contraste a que se utiliza el material húmedo debido a que así es como entrará en el horno a diseñar y que no se conoce la longitud de onda específica de los rayos emitidos por las bombillas.

Acorde a la norma anteriormente referida (ASTM E168-16), las muestras para las mediciones infrarrojas difieren a la norma utilizada para el tratamiento de la muestra para secado de materiales, ya que esta exige que el material sea aplanado y desterronado, puesto que los poros y desniveles afectan el rayo incidente y en consecuencia la medición, a diferencia de la norma de secado que indica que sólo se debe tamizar en función de la masa a evaluar.

6 Conclusiones

La presente caracterización de arcilla ante el calentamiento por radiación infrarroja describe el comportamiento de las diferentes variables tales como, la emisividad y la absorptividad del material en función de la temperatura y la masa evaporada respectivamente. También, se resalta la influencia y contribución de la radiación en el secado al combinarlo con una corriente de aire convectiva. Para la realización de las curvas del comportamiento de la humedad en el sólido, se hizo uso del túnel de secado perteneciente al laboratorio de operaciones unitarias de Ingeniería Química y con gestión del grupo GASURE, se plantea un rediseño del soporte de las probetas para que sostener los elementos radiantes que contribuyan en el secado, ahora en base al calor incidente y absorbido se determina la absorptividad teórica. Para determinar la emisividad, se realiza el calentamiento del material y en base a su temperatura se gradúa la emisividad del material con un termopar de contacto y una cámara termográfica. Todo lo anterior se realiza en las instalaciones de la universidad de Antioquia a 25°C y 85.4 kPa; con el enfoque de la viabilidad del diseño y escalado de un horno que opere en modo sin llama, donde prima la transferencia de calor por radiación, brindando mejoras en base a la emisión, volumen y tiempo de secado del material. Finalmente, de lo anterior se pudieron obtener las siguientes conclusiones:

- Las tecnologías de secado por radiación infrarroja pura sólo se pueden utilizar en sitios con baja humedad relativa (Máximo 80%) y no confinados, dado que debe haber aire de remoción (Con capacidad para almacenar vapor de agua) que se encargue de transportar la humedad al ambiente. De igual manera, se debe realizar un diseño que garantice una evacuación del vapor generado y no incremente la humedad relativa en el recinto.
- Secar arcilla con radiación térmica en el espectro infrarrojo implica acortar tiempos de proceso comparado con el secado por convección y proporciona a la arcilla la misma apariencia física que secar con este último. Para dar un orden de magnitud, dichos tiempos de secado con el experimento híbrido corresponden al 9.09 % del tiempo consumido en el secado convectivo en el mejor de los experimentos realizados.
- Los valores obtenidos de emisividad en función de la temperatura corresponden a los de la literatura, aunque a temperaturas más bajas se presenta mayor error en la medida, lo anterior se debe a la temperatura reflejada que posee el sitio, debido a que es la misma a la que se encuentra el sólido generando la incertidumbre en la cámara termográfica. Por tal motivo, para realizar las mediciones en un rango de 25 a 38 °C es recomendado realizarlo en un sitio aislado de luz visible y fuentes de calor pronunciadas.
- Dada la composición de las arcillas y su heterogeneidad se concluye que para caracterizarlas se recomienda replicar los diferentes experimentos y pruebas a las que fue sometido el material para promediar sus resultados.
- Al secar de forma híbrida (convección-radiación), el primer parámetro influyente es la intensidad de radiación, el segundo parámetro adecuado para tener en cuenta es la velocidad del fluido, el cual incrementa la tasa de secado por encima a variar la temperatura del gas. Aunque se debe tener en cuenta que, en la aplicación de un sistema a gran escala esto involucra impulsos más altos en las arcillas, generando levantamiento de esta misma o a su vez menor tiempo de residencia en el contacto gas-sólido motivo por el cuál la eficiencia no sería la óptima. La velocidad del flujo del gas se considera como factor crucial luego de superar un régimen a velocidad de 1.5 m/s, antes de adquirir dicho valor, la influencia de la variable es pequeña.

- El hecho de utilizar radiación infrarroja en baja proporción en un montaje convectivo aumenta el flux de secado hasta 4 veces el valor inicial, a causa de que la radiación se enfoca en la capa superficial de humedad del sólido aumentando el coeficiente difusivo con el aire de remoción.
- El método de ordenadas discretas presenta un perfil de radiación incidente similar al medido por el radiómetro en el montaje de lámparas infrarrojas, debido a la uniformidad en los rayos radiados por estas.
- Los cálculos de soportes para el banco de pruebas no requieren de alta rigurosidad para el presente sistema, esto debido a que las cargas a las que es sometido el material son extremadamente bajas y un acero comercial y económico puede suplir dicha necesidad.
- La influencia de la humedad en el sólido afecta las propiedades térmicas de este. Mas aún, el material bruto es el que se va a procesar y por lo tanto los valores obtenidos en los experimentos son fiables para realizar los cálculos posteriores. Cabe anexar que, en cuanto a la humedad del sistema, es necesario tener una diferencia de concentración para que haya secado, aunque su peso en el aumento del flux es mucho menor que la velocidad o la intensidad de radiación.
- Aproximar la arcilla como un sólido gris, difuso y en equilibrio, es decir que la emisividad sea igual a la absorptividad, es una consideración adecuada en la etapa de secado constante, presentando variaciones del 4 %. Por otra parte, en la cuantificación de la absorptividad del material en el secado decreciente se obtiene un decaimiento del 70 % del valor obtenido en la tasa de secado constante, siendo este un fenómeno que se explica por la baja absorción que involucra al sólido cuando ya ha perdido cierta cantidad de humedad que contribuye a absorber los rayos infrarrojos. También se puede apreciar una variación respecto al valor de la literatura, esto se atribuye a la parte convectiva del sistema.
- Las propiedades radiantes obtenidas de la arcilla permiten realizar el cálculo ingenieril de transferencia de calor en el sólido, evaluando la viabilidad de un sistema radiativo por medio de la absorción y emisión de dicha energía, todo en pro de aprovechar la mayor energía posible que el proceso permita. En cuanto a los valores obtenidos, se observa que tanto la absorptividad como la emisividad son relativamente altos comparados con los obtenidos de otras arcillas y más aún en las temperaturas de operación del secado [86], lo que brinda al proyecto confiabilidad en los resultados de optimización.
- La tasa de secado en el montaje convectivo conlleva tiempos de secado altamente prolongados (mayores de 10 horas) en el material, además de exponer el material a contacto directo con el gas, lo cual en la industria alimenticia no es lo adecuado. Por otra parte, el secado radiativo, utiliza la transferencia de calor más rápida lo que implica tiempos de secado más cortos y dejando al material libre de contacto con gases, el problema de este radica en que exige espacios donde el aire circule por convección natural y con humedades relativas menores al 85%. Finalmente, el secado híbrido adquiere un efecto combinado de ambos arreglos, donde la tasa de secado del material aumenta por el efecto radiativo, la humedad del gas puede ser manipulada por el calentamiento de este, lo que supone no requerir espacios amplios; además, dado el poco tiempo de exposición requerido, el contacto con el material es relativamente corto.

7 Trabajos futuros

- Diseño de un túnel de secado híbrido para el grupo GASURE para complementar y extender las pruebas realizadas en materiales tanto orgánicos como inorgánicos. Las pruebas de complemento se recomiendan realizarlas con monitoreo en la temperatura del sólido con la finalidad de llevar a cabo el diseño del diagrama de resistencias térmicas del montaje y así dividir el flux.
- Realizar un montaje 100 % radiativo con escape para la humedad extraída del material para determinar las curvas de secado con este tipo de experimentos y compararlas con el secado convectivo a igual flux
- Comparar pruebas de secado por radiación infrarroja y microondas para evaluar su viabilidad y eficiencia en el secado del material.
- Comprobar el secado de los elementos descritos en los artículos, utilizando velocidades mayores a 1.5 m/s para determinar la influencia de la velocidad en el secado de los materiales orgánicos.
- Probar diferentes tipos de arcillas en el prototipo de secado híbrido para determinar si en la etapa de secado constante, la absorptividad del material influye en este proceso.

8 Bibliografía

- [1] K. Ponkham, N. Meeso, S. Soponronnarit, and S. Siriamornpun, “Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 90, no. 2, pp. 155–164, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.fbp.2011.02.008.
- [2] D. Nowak and P. P. Lewicki, “Infrared drying of apple slices,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 353–360, Sep. 2004, doi: 10.1016/j.ifset.2004.03.003.
- [3] I. Hammouda and D. Mihoubi, “Comparative numerical study of kaolin clay with three drying methods: Convective, convective–microwave and convective infrared modes,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 87, pp. 832–839, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.07.085.
- [4] GASURE, “GASURE Grupo de ciencia y tecnología del gas y uso racional de la energía,” 2019. [Online]. Available: <http://gasure.udea.edu.co/es/node/3>.
- [5] UPME, “Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050,” 2015.
- [6] RED INCOMBUSTION, “Diagnóstico Energético en los Sectores Industriales Colombianos.”
- [7] ANDI, *Comité del sector cerámico*. 2017.
- [8] G. F. Metz, “CERAMIC RAW MATERIALS, DRIERS AND DRYING1,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 7, no. 7, pp. 504–508, Jul. 1924, doi: 10.1111/j.1151-2916.1924.tb18249.x.
- [9] T. A. SA, “Gases de combustión,” 2018. [Online]. Available: <http://www.academiatesto.com.ar/cms/gases-de-combustion-1>.
- [10] J. M. Dóminguez, “Las arcillas: El barro noble,” 2019. [Online]. Available: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/arcillas.html>.
- [11] Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, “Caracterización Ocupacional Industria de la Arcilla,” 2003.
- [12] C. K. Wentworth, “A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments,” *J. Geol.*, vol. 30, no. 5, pp. 377–392, Jul. 1922, doi: 10.1086/622910.
- [13] L. Rodríguez and R. Torrecillas, “Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones,” *Boletín la Soc. Española Cerámica y Vidr. ISSN 0366-3175, Vol. 41, Nº. 5, 2002, pags. 459-470*, vol. 41, Oct. 2011, doi: 10.3989/cyv.2002.v41.i5.665.
- [14] A. García León, E. Flórez Solano, and Y. Medina Cárdenas, “Caracterización física de las arcillas utilizadas en la fabricación de productos de mampostería para la construcción en Ocaña Norte de Santander (Colombia),” *ESPACIOS*, vol. 39, p. 6, 2018.
- [15] L. Díaz and R. Torrecillas, “Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones,” *Boletín la Soc. Española Cerámica y Vidr.*, vol. 41, no. 5, pp. 459–470, 2002.
- [16] L. Andrade, E. F. Covelo, and F. A. Vega, “Uso de Arcillas Especiales para Depuración de Aguas Residuales,” *Inf. tecnológica*, vol. 16, no. 1, 2005, doi: 10.4067/S0718-07642005000100002.
- [17] “EcuRed: Enciclopedia cubana,” *Reología*, 2018. [Online]. Available: <https://www.ecured.cu/Reología>.
- [18] J. B. S., “The Kaolin Minerals. By C. S. Ross, and P. F. Kerr. United States Geological Survey Professional Paper No. 165E. pp. 151–76. 1931.,” *Geol. Mag.*, vol. 69, no. 4, pp. 188–189, Apr. 1932, doi: 10.1017/S0016756800097156.
- [19] “EcuRed: Enciclopedia cubana,” *Meteorización*, 2018. [Online]. Available: <https://www.ecured.cu/Meteorización>.
- [20] Schlumberger, “Oilfield Glosary,” *Caolinita*, 2020. [Online]. Available: <https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/k/kaolinite.aspx>.
- [21] “EcuRed: Enciclopedia cubana,” *Arcilla*, 2018. [Online]. Available: <https://www.ecured.cu/Arcilla>.
- [22] E. García Romero and M. Suárez Barrios, *Las arcillas: Propiedades y usos*. .
- [23] A. D. McNaught and A. Wilkinson, *Compendium of Chemical Terminology*, 2nd ed. 2019.
- [24] J. Pérez Porto, “Porosidad,” 2019. [Online]. Available: <https://definicion.de/porosidad/>.

- [25] J. Pérez Porto and M. Merino, “Capilaridad,” 2018. [Online]. Available: <https://definicion.de/capilaridad/>.
- [26] P. Sembenelli, “Los límites de Atterberg y su significado en la industria cerámica y ladrillera,” *L'Industria Ital. dei Laterizi*, p. 43, 1966.
- [27] C. Sierra, “EL MERCURIO,” *Textura, la principal propiedad física del suelo*, 2019. [Online]. Available: <https://www.elmercurio.com/Campo/Noticias/Análisis/2018/04/25/Textura-la-principal-propiedad-fisica-del-suelo.aspx>.
- [28] L. Rucks, F. García, A. Kaplán, J. Ponce de León, and M. Hill, *Propiedades Físicas del Suelo*. Montevideo-Uruguay, 2004.
- [29] Botanicals Group, “BOTANICALS,” *Arcilla Coloidal ó Bentonita*, 2014. [Online]. Available: <https://www.botanicals.es/arcillas-sales-y-algas/806-arcilla-coloidal-o-bentonita.html>.
- [30] M. Litzler, “Understanding drying methods,” 2006.
- [31] Y. Itaya, S. Uchiyama, S. Hatano, and S. Mori, “Drying enhancement of clay slab by microwave heating. *Drying Technol* 2005;23:1243–55.”, *Dry. Technol*, vol. 23, no. 1243, p. 55, 2005.
- [32] S. Kowalski, K. Rajewska, and A. Rybicki, “Stresses generated during convective and microwave drying,” *Dry. Techno*, vol. 23, no. 1875, p. 93, 2005.
- [33] J. Kiennemann, T. Chartier, C. Pagnoux, J. F. Baumard, M. Huger, and J. M. Laméran, “Drying mechanisms and stress development in aqueous alumina tape casting,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 25, no. 9, pp. 1551–1564, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.05.028.
- [34] A. J. Çengel, Y. A., & Ghajar, *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*, 4th ed. McGraw-Hill, 2014.
- [35] G. T. Lockwood F, Mersmann M, “The flameless oxidation principal for improved calciner performance, *Int. Cem. Rev.*,” 2008.
- [36] K. H. Hebbar, U., Vishwanathan, “Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables,” *J. Food Eng.*, vol. 65, no. 4, pp. 557–563, Jan. 2004.
- [37] F. Incropera and D. Dewitt, *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: Pretince Hall, 1999.
- [38] H. J.P, *Transferencia de calor*, 10th ed. 1999.
- [39] J. C. Day, M. K. Zemler, M. J. Traum, and S. K. S. Boetcher, “Laminar Natural Convection From Isothermal Vertical Cylinders: Revisting a Classical Subject,” *J. Heat Transfer*, vol. 135, no. 2, Feb. 2013, doi: 10.1115/1.4007421.
- [40] K. Heyde, *Basic Ideas and Concepts in Nuclear Physics*. 2004.
- [41] M. Tye-Gingras and L. Gosselin, “Investigation on heat transfer modeling assumptions for radiant panels with serpentine layout,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 7, pp. 1598–1608, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.03.004.
- [42] S. B. Bopche and A. Sridharan, “Local configuration factors for radiant interchange between cylindrical surfaces in rod bundle geometry,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 241, no. 3, pp. 903–924, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.nucengdes.2010.12.020.
- [43] C. Bao, N. Cai, and E. Croiset, “An analytical model of view factors for radiation heat transfer in planar and tubular solid oxide fuel cells,” *J. Power Sources*, vol. 196, no. 6, pp. 3223–3232, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.11.128.
- [44] R. E. Treybal, *Mass Transfer Operations*, 3rd ed. .
- [45] R. C. Reid and T. K. Sherwood, *Propiedades de los gases y líquidos. Su estimulación y correlación*. Mexico, 1968.
- [46] R. Masciarelli, S. Stancich, and F. Stoppani, *Transferencia de Materia*. 2012.
- [47] J. Warnatz, U. Mass, and R. . Dibble, *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*, 4th ed. Springer, 1996.
- [48] P. Wanyo, S. Siriamornpun, and N. Meeso, “Improvement of quality and antioxidant properties of

- dried mulberry leaves with combined far-infrared radiation and air convection in Thai tea process,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 89, no. 1, pp. 22–30, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.fbp.2010.03.005.
- [49] A. J. Çengel, Y. A., & Ghajar, *Termodinámica*, 7ma ed. McGraw-Hill.
- [50] Ecocarbón and Universidad Pontificia Bolivariana, *Hornos Ladrilleros a Carbón*. Universidad Pontificia Bolivariana, 1998.
- [51] *Improving Process Heating System Performance: A Sourcebook for Industry*. United States, 2004.
- [52] H. Pawlak–Kruczek *et al.*, “Drying of Lignite of Various Origins in a Pilot Scale Toroidal Fluidized Bed Dryer using Low Quality Heat,” *Energies*, vol. 12, no. 7, p. 1191, Mar. 2019, doi: 10.3390/en12071191.
- [53] THOMPSON DRYERS, “Types of Dryers,” 2020. [Online]. Available: <https://www.thomsondryers.com/types-of-dryers/>.
- [54] A. Kuye *et al.*, *Design and fabrication of a flash dryer for the production of high quality cassava flour*. 2011.
- [55] GEA Group Aktiengesellschaft, “Secador de lecho fluidizado (Estático),” 2020. [Online]. Available: <https://www.gea.com/es/products/fluid-bed-dryer.jsp>.
- [56] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*. New York: Taylor and Francis Group, 2015.
- [57] UBE MACHINERY CORPORATION, “Steam Tube Dryer (STD),” 2020. [Online]. Available: <https://www.ubemachinery.co.jp/english/product/kiln-steam.html>.
- [58] “Hongji New Type Energy Saving Industrial Drying Equipment Rotary Drum Dryer,” 2020. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Hongji-New-Type-Energy-Saving-Industrial_1180556922.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.580a4ed8XksT5a.
- [59] POWDERTRONIC, “Aplicaciones del horno de secado,” 2020. [Online]. Available: <https://powdertronic.com/aplicaciones-del-horno-de-secado/>.
- [60] C. Chilan, K. Intriago, J. Laz, and C. Ceballos, “Secado,” Guayaquil, 2016.
- [61] CREO Parametric, “Modelado de transferencia de calor radiativa.” [Online]. Available: https://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/r6.0/spanish/index.html#page/simulate/cfd/Radiation/Modeling_RadiativeHeatTransfer.html.
- [62] M. E. Williamson and D. I. Wilson, “Development of an improved heating system for industrial tunnel baking ovens,” *J. Food Eng.*, vol. 91, no. 1, pp. 64–71, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.08.004.
- [63] J. R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*. CRC Press, 2010.
- [64] E. . Keramida, H. . Liakos, M. . Founti, A. . Boudouvis, and N. . Markatos, “Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 43, no. 10, pp. 1801–1809, May 2000, doi: 10.1016/S0017-9310(99)00244-6.
- [65] M. G. Carvalho and T. L. Farias, “Modelling of Heat Transfer in Radiating and Combusting Systems,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 76, no. 2, pp. 175–184, Feb. 1998, doi: 10.1205/026387698524749.
- [66] Y. Wu, D. C. Haworth, M. F. Modest, and B. Cuenot, “Direct numerical simulation of turbulence/radiation interaction in premixed combustion systems,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 30, no. 1, pp. 639–646, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.proci.2004.08.138.
- [67] T. W. Tong and W. Li, “Enhancement of thermal emission from porous radiant burners,” *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 53, no. 2, pp. 235–248, Feb. 1995, doi: 10.1016/0022-4073(95)90010-1.
- [68] M. Bidi, R. Hosseini, and M. R. H. Nobari, “Numerical analysis of methane–air combustion considering radiation effect,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 12, pp. 3634–3647, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2008.07.010.
- [69] P. S. Cumber, “Improvements to the discrete transfer method of calculating radiative heat

- transfer,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 38, no. 12, pp. 2251–2258, Aug. 1995, doi: 10.1016/0017-9310(94)00354-X.
- [70] N. Tsioumanis, J. G. Brammer, and J. Hubert, “Flow processes in a radiant tube burner: Combusting flow,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 7, pp. 2667–2675, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2011.02.008.
- [71] S. S. Sazhin, E. M. Sazhina, O. Faltsi-Saravelou, and P. Wild, “The P-1 model for thermal radiation transfer: advantages and limitations,” *Fuel*, vol. 75, no. 3, pp. 289–294, Feb. 1996, doi: 10.1016/0016-2361(95)00269-3.
- [72] V. Feldheim and P. Lybaert, “Solution of radiative heat transfer problems with the discrete transfer method applied to triangular meshes,” *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 168, no. 1–2, pp. 179–190, Jul. 2004, doi: 10.1016/j.cam.2003.05.016.
- [73] S. Kumar, A. Majumdar, and C. L. Tien, “The Differential-Discrete-Ordinate Method for Solutions of the Equation of Radiative Transfer,” *J. Heat Transfer*, vol. 112, no. 2, pp. 424–429, May 1990, doi: 10.1115/1.2910395.
- [74] R. Tucker, “Combustion Handbook in File,” 65, 2001.
- [75] P. J. Coelho, J. M. Gonçaves, M. G. Carvalho, and D. N. Trivic, “Modelling of radiative heat transfer in enclosures with obstacles,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 41, no. 4–5, pp. 745–756, Feb. 1998, doi: 10.1016/S0017-9310(97)00158-0.
- [76] R. Viskanta, “Overview of convection and radiation in high temperature gas flows,” *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 36, no. 12–14, pp. 1677–1699, Sep. 1998, doi: 10.1016/S0020-7225(98)00053-6.
- [77] R. Viskanta, “Radiation heat transfer in combustion systems,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 97–160, 1987, doi: 10.1016/0360-1285(87)90008-6.
- [78] T. Vázquez, “Aplicaciones prácticas de la espectroscopía de absorción infrarroja en el estudio de los crudos, del clínker y del cemento portland anhidro,” *Mater. Construcción*, vol. 30, no. 179, pp. 101–110, Sep. 1980, doi: 10.3989/mc.1980.v30.i179.1052.
- [79] J. Wüning, “Flameless combustion and its applications,” in *14th IFRF Members Conf. Noordwijkerhout*, 2004, pp. 1–12.
- [80] P. S. R. S. Solanki Kaushik M1, “Analysis in drying process in ceramic tile industry,” *IJARIE-ISSN(O)-2395-4396*, vol. 2, no. 3, 2016.
- [81] “<https://www.sumicol.com.co/nuestro-negocio/donde-nos-encontramos/>,” 2017. [Online]. Available: <https://www.sumicol.com.co/nuestro-negocio/donde-nos-encontramos/>.
- [82] “Coastal Engineering Manual - Knovel.” [Online]. Available: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpCEM0000P/viewerType:toc//root_slug:coastal-engineering-manual/url_slug:table-iii-1-4-densities?b-q=kaolinite&b-subscription=true&b-group-by=true&b-sort-on=default&b-content-type=all_references&include_synonyms=no. [Accessed: 16-Dec-2019].
- [83] A. Kumar and P. Lingfa, “Sodium bentonite and kaolin clays: Comparative study on their FT-IR, XRF, and XRD,” *Mater. Today Proc.*, vol. 22, pp. 737–742, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.10.037.
- [84] “EcuRed: Enciclopedia Cubana.” [Online]. Available: <https://www.ecured.cu/Caolín>.
- [85] G. Wypych, “FILLERS – ORIGIN, CHEMICAL COMPOSITION, PROPERTIES, AND MORPHOLOGY,” in *Handbook of Fillers*, Elsevier, 2016, pp. 13–266.
- [86] P. R. J. DAVIS WOO, H. P. SIMONS, “Drying rate in infrared drying clay,” *J. Am. Ceram. Soc. - Woo, Simons, Jones*, vol. 38, 1955.
- [87] W. H. McAdams, *TRANSMISION DE CALOR*. Madrid: Ediciones Del Castillo, 2007.
- [88] Konica Minolta Sensing Americas, “Radiómetros y fotómetros,” *Radiómetros y fotómetros*. [Online]. Available: <http://sensing.konicaminolta.com.mx/learning-center/light->

- measurement/radiometers-photometers/.
- [89] Y. Cadavid and F. Cano, “Principio de funcionamiento Cámara Termográfica y Radiómetro,” 2016.
- [90] P. Franco Gil, “VIABILIDAD TÉCNICA DE LA TOSTACIÓN DE CAFÉ ARÁBICA ORIGEN PUEBLO RICO ANTIOQUIA EN HORNO DE RADIACIÓN INFRARROJA,” Universidad de Antioquia, 2017.
- [91] M. Santizo, “Secado de sólidos en régimen estable,” 2020. [Online]. Available: <http://www.proenergia.org/441249262>.
- [92] ACME, *SILENTVANE 3000 SERIES*. MUSKOGEE, OKLAHOMA, 2004.
- [93] C. Veloso, “Funcionamiento de un sensor de temperatura,” 2016. [Online]. Available: <https://www.electrontools.com/Home/WP/2016/03/30/funcionamiento-de-un-sensor-de-temperatura/>.
- [94] Mundo Motor, “Sensor De Temperatura: Características Y Funcionamiento.,” 2018. .
- [95] IEEE GlobalSpec, “Relative Humidity/Temp Transmitter -- HX94AC & HX94AV,” 2020. [Online]. Available: <https://datasheets.globalspec.com/ds/321/OMEGAEngineering/06430A76-5877-4365-92B7-7D492AD6F5D8>.
- [96] F. Sendra Portelo and M. Martínez Morrillo, “RADIACIÓN INFRARROJA.”
- [97] A. Gonzalez, “Anemómetro: ¿qué es?, funcionamiento, importancia, tipos y más,” 2019. [Online]. Available: https://magicanaturaleza.com/c-vientos/anemometro/#Como_funciona_un_anemometro.
- [98] CHY FIREMATE, “Anemometer,” 2010. [Online]. Available: <http://www.chy-meter.com/goods.php?act=view&no=51>.
- [99] Infoagro Systems, “ANEMÓMETRO,” 2019. [Online]. Available: https://infoagro.com/instrumentos_medida/doc_anemometro_velocidad_viento.asp?k=80.
- [100] M. Espinosa Esquivel, “Diseño y construcción de una celda de carga,” UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, 1995.
- [101] MatWeb, “AISI 1010 Steel, cold drawn.” [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=025d4a04c2c640c9b0eaaef28318d761&ckck=1>.
- [102] Grupo INTERCOM, “Técnicas de medición termográfica. Midiendo la emisividad,” 2019. [Online]. Available: https://www.construmatica.com/construpedia/Técnicas_de_medición_termográfica._Midiendo_la_emisividad.
- [103] Fluke Process Instruments., “Qué es la emisividad?,” 2019. [Online]. Available: <https://www.flukeprocessinstruments.com/es/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/what-emissivity%3F>.
- [104] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, 2nd ed. PEARSON Prentice Hall, 2007.
- [105] IDEAM - Instituto de Hidrología; Meteorología y Estudios Ambientales, “IDEAM,” 2010. [Online]. Available: http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Humedad-relativa_tabla.pdf.
- [106] A. Pardo and M. Ruiz, *Análisis de datos con SPSS 13 Base*. 2005.
- [107] “No Title,” doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1955.tb14561.x>.
- [108] C. L. Yaws, “Yaws’ Critical Property Data for Chemical Engineers and Chemists,” 2012. .
- [109] N. K. Tolochko, Y. V. Khlopkov, S. E. Mozzharov, M. B. Ignatiev, T. Laoui, and V. I. Titov, “Absorptance of powder materials suitable for laser sintering,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 6, no. 3, pp. 155–161, Sep. 2000, doi: 10.1108/13552540010337029.
- [110] R. W. McVey, R. M. Melnychuk, J. A. Todd, and R. P. Martukanitz, “Absorption of laser

- irradiation in a porous powder layer,” *J. Laser Appl.*, vol. 19, no. 4, pp. 214–224, Nov. 2007, doi: 10.2351/1.2756854.
- [111] A. Rubenchik, S. Wu, S. Mitchell, I. Golosker, M. LeBlanc, and N. Peterson, “Direct measurements of temperature-dependent laser absorptivity of metal powders,” *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 24, p. 7230, Aug. 2015, doi: 10.1364/AO.54.007230.
- [112] J. Trapp, A. M. Rubenchik, G. Guss, and M. J. Matthews, “In situ absorptivity measurements of metallic powders during laser powder-bed fusion additive manufacturing,” *Appl. Mater. Today*, vol. 9, pp. 341–349, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.apmt.2017.08.006.

