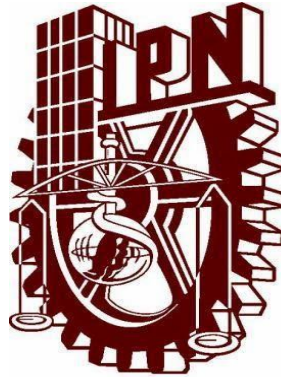


INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y
Tecnología Avanzada.



**“PROPIEDADES FOTOTERMICAS EN MATERIALES COMPUESTOS A
BASE DE CEMENTO”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN TECNOLOGIA AVANZADA

PRESENTA

FERNANDO ROCHA ARGOTE

CIUDAD DE MEXICO

JULIO DE 2017

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y
Tecnología Avanzada.



CICATA LEGARIA

“PROPIEDADES FOTOTERMICAS EN MATERIALES COMPUESTOS A
BASE DE CEMENTO”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN TECNOLOGIA AVANZADA

PRESENTA

FERNANDO ROCHA ARGOTE

CIUDAD DE MEXICO

JULIO DE 2017



SIP-14-BIS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 13:00 horas del día 5 del mes de Junio del 2017 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-Legaria para examinar la tesis titulada: "PROPIEDADES FOTOTERMICAS EN MATERIALES COMPUESTOS A BASE DE CEMENTO"

Presentada por el alumno:

ROCHA
Apellido paterno

ARGOTE
Apellido materno

FERNANDO
Nombre(s)

Con registro:

B	1	5	0	5	5	9
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Tecnología Avanzada

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. José Antonio Calderón Arenas

Dr. Ernesto Marín Moares

Dr. Joel Hernández Wong

Dr. José Bruno Rojas Trigos

Dr. Uriel Nogal Luis

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dra. Mónica Rosalía Jaime Fonseca





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 5 del mes Junio del año 2017, el que suscribe Fernando Rocha Argote alumno del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro B150559, adscrito a el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Legaria CICATA-Legaria, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. José Antonio Calderón Arenas y Dr. Joel Hernández Wong cede los derechos del trabajo intitulado "Propiedades Fototérmicas en materiales compuestos a base de cemento", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección fernando.rocha.argote@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Fernando Rocha Argote



RESUMEN

Mediante la aplicación del sistema analizador de propiedades térmicas *Hot Disk* se obtuvieron los valores experimentales de la conductividad y difusividad térmica y por análisis numérico utilizando COMSOL Multiphysics se calcularon los valores de dichas propiedades haciendo una comparación de resultados. Asimismo, se aplicó el modelo de Maxwell-Rayleigh al sistema de muestras estudiadas y se determinó su rango de validez con la fracción de volumen de acuerdo a los resultados experimentales y numéricos.

Se elaboraron muestras de composites de concreto con agregados de esferas de poliestireno en una red periódica cúbica simple con fracciones de volumen desde un valor de 0.012 a 0.2, de acuerdo a la norma NMX-C-061-ONNCCE / ASTM C-31/ASTM C-192.

Aplicando el sistema analizador de propiedades térmicas *Hot Disk* se obtuvieron los valores experimentales de la conductividad (k) y difusividad térmica (α) en las muestras de composites de concreto en función de la fracción de volumen (ν) de los agregados de esferas de poliestireno.

Se obtuvo el comportamiento teórico de k y α con ν utilizando el modelo de Maxwell-Rayleigh con resultados similares a los obtenidos en forma experimental pero con errores porcentuales ($e\%$) en su comparación que van del 2 al 12% para k y del 0.2 al 3% para α .

Debido a las significativas desviaciones del modelo de Maxwell-Rayleigh a los resultados experimentales para altos valores de ν se realizó la simulación numérica mediante COMSOL *Multiphysics* para demostrar su utilidad predictiva, sobre todo en el rango de ν donde el modelo de Maxwell-Rayleigh deja de ser confiable.

Para proponer un valor umbral ν_o del rango de validez para ν se realizó la comparación de los resultados teóricos con los numéricos, realizando el análisis para valores de ν hasta de 0.5.

Por último, se llevaron a cabo análisis numéricos y teóricos con el modelo de Maxwell-Rayleigh para composites de concreto con agregados de esferas de poliestireno dispuestas en una red periódica cubica centrada en el cuerpo.



ABSTRACT

The thermal conductivity and thermal diffusivity values were obtained by applying the Hot Disk thermal properties system and by a numerical analysis using COMSOL Multiphysics, the values of these properties were calculated by making a comparison of the results. Also, the Maxwell-Rayleigh model was applied to the sample system studied and its validity range was determined with the volume fraction according to the experimental and numerical results.

Samples of concrete composites with aggregates of polystyrene spheres in a symmetrical cubic periodic network were made from 0.012 to 0.2, according to the standard NMX-C-061-ONNCCE / ASTM C-31 / ASTM C- 192.

By applying the Hot Disk thermal properties analyzer system, the experimental values of conductivity (k) and thermal diffusivity (α) were obtained in samples of concrete composites as a function of the volume fraction (ν) of the polystyrene spheres aggregates.

The theoretical behavior of k and α as a function of ν were obtained by using the Maxwell-Rayleigh model with results similar to those obtained experimentally but with percentage errors (e%) in their comparison that go from 2 to 12% for k and from 0.2 to 3% for α .

Due to the significant deviations of the Maxwell-Rayleigh model from the experimental results for high values of ν , the numerical simulation using COMSOL Multiphysics was used to demonstrate its predictive utility, especially in the range of ν where the Maxwell-Rayleigh model is no longer reliable.

In order to propose a threshold value ν_0 of the validity range for ν the theoretical and numerical results were compared, performing the analysis for values of ν up to 0.5.

Finally, numerical and theoretical analyzes were carried out with the Maxwell-Rayleigh model for concrete composites with aggregates of polystyrene spheres arranged in a cubic periodic network centered in the body.



INDICE

Sección	Página
CAPITULO 1.INTRODUCCION	1
Propiedades térmicas de los concretos	1
Compositos a base de concreto.....	3
Concreto polimérico	4
Concreto con fibras	4
Concreto elaborados con Caucho.....	4
El analizador de constantes térmicas <i>Hot Disk</i>	5
Simulación de Procesos mediante COMSOL.....	5
Estado del arte	7
Descripción del problema a resolver.	9
Justificación:.....	10
Objetivo General:	10
Objetivos Específicos:	10
Descripción del contenido de cada capítulo.	11
CAPITULO 2. FUNDAMENTOS TEORICOS.....	12
2.1 Transferencia de calor.	12
2.1.1 Mecanismos de transferencia de calor.	12
2.2Propiedades térmicas de las sustancias.....	14
2.2.1Conductividad Térmica.....	14
2.2.2Calor específico	15
2.2.3Capacidad calorífica molar	15



2.2.4	Capacidad calorífica volumétrica	16
2.2.5	Efusividad térmica.	16
2.2.6	Difusividad Térmica	17
2.2.7	Ecuación de Difusión de Calor	17
2.2.8	Balance de Energía	18
2.2.9	Condiciones de frontera	19
2.3	Características del concreto	21
2.3.1	Trabajabilidad	22
2.3.2	Cohesividad	23
2.3.3	Durabilidad	23
2.4	El analizador de constantes térmicas <i>Hot Disk</i>	25
2.5	Simulación de procesos mediante COMSOL Multiphysics	30
2.5.2	Simulación.	31
CAPITULO 3. DETERMINACION DE PROPIEDADES TERMICAS EN COMPOSITOS DE CONCRETO CON AGREGADOS DE ESFERAS DE POLIESTIRENO.		33
3.1	Introducción.....	33
3.2	Modelo Maxwell-Rayleigh.....	33
3.3	Procedimiento experimental.....	35
3.3.1	Elaboración de muestras.	36
3.3.1.1	Dosificación.	36
3.3.1.2	Preparación de muestras de concreto.....	40
3.1.2	Experimento mediante la técnica de <i>Hot Disk</i>	42
3.2	Resultados.....	44



3.3 Análisis de resultados.....	57
CAPITULO 4. ANALISIS DE LAS PROPIEDADES TERMICAS EN COMPOSITOS DE CONCRETO MEDIANTE SIMULACION NUMERICA POR COMSOL Multiphysics.	63
4.1 Introducción.....	63
4.2 Modelado.....	63
4.2.1 Pre-procesamiento.	63
4.2.2 Procesamiento.....	67
4.2.3 Postprocesamiento.....	67
4.3. Comparación de la simulación con el modelo de Maxwell-Raileygh y el experimento con la técnica de Hot Disk.....	68
4.3.1 Comparación con el Modelo de Maxwell-Raileygh.....	68
4.3.2 Comparación de los resultados de la simulación con los resultados experimentales.	71
4.4 Sistema de distribución de esferas de red periódica cúbica centrada en el cuerpo.	72
CAPITULO 5. CONCLUSIONES	75

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
Tabla 1. Coeficientes de los valores de los polinomios $D_n(\tau)$ - $D_n(0.03)$	28
Tabla 2. Prestaciones técnicas. Diferentes modelos de TPS.....	29
Tabla 3. Condiciones generales para dosificación.....	36
Tabla 4. Propiedades físicas de materiales empleados.	37
Tabla 5. Proporciones de material.	38
Tabla 6. Proporciones de material para muestras de 47.51cm^3	38



Tabla 7. Muestras de compositos de concreto con diferentes fracciones de volumen.	41
Tabla 8. Parámetros de ensayo de la Técnica Hot Disk.....	43
Tabla 9. Resultados experimentales por la técnica de Hot Disk.....	48
Tabla 10. Conductividad y difusividad térmica de compositos de concreto con inclusión de esferas de poliestireno a distintas fracciones de volumen.	57
Tabla 11. Comparación de valores experimentales con los valores teóricos del modelo.	59
Tabla 12. Comparación de valores experimentales de difusividad térmica con los valores teóricos del modelo.	60
Tabla 13. Ecuación del ajuste lineal de los resultados experimentales.	61
Tabla 14. Parámetros de simulación mediante COMSOL Multiphysics.....	64
Tabla 15. Propiedades del concreto.	64
Tabla 16. Propiedades del poliestireno.....	65
Tabla 17. Parámetros del tamaño del elemento.	67
Tabla 18. Resultados de la simulación para diferentes fracciones de volumen.....	68
Tabla 19. Comparación de resultados de Conductividad térmica de la simulación con el modelo.....	69
Tabla 20. Comparación de resultados de la difusividad térmica de la simulación con el modelo.....	70
Tabla 21. Comparación de resultados de la conductividad térmica de la simulación con el experimento.....	71
Tabla 22. Comparación de resultados de la difusividad térmica de la simulación con el experimento.....	71
Tabla 23. Resultados de conductividad y difusividad térmica con distribución centrado en el cuerpo.	72
Tabla 24. Comparación de los resultados de conductividad termica de la simulación del sistema de distribución centrado en el cuerpo con el modelo de Maxwell-Rayleigh.....	73
Tabla 25. Comparación de los resultados de difusividad termica de la simulación del sistema de distribución centrado en el cuerpo con el modelo de Maxwell-Rayleigh.	74



LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Ilustración del sensor de mica en el ensayo de propiedades térmicas.	9
Figura 2. Transferencia de calor por conducción.	13
Figura 3. Proceso de Convección.	14
Figura 4. Volumen de control para el análisis de la conducción de calor.	18
Figura 5. Condición de frontera de Dirichlet.	19
Figura 6. Condición de frontera de Neumann.	20
Figura 7. Condición de frontera de Cauchy.	21
Figura 8. Funciones $D_n(\tau)$ - $D_n(0.03)$	27
Figura 9. A. Diseño de sensor 5501, b. Hot disk con el soporte y tapa.	29
Figura 10. Mallado de dominio con elementos triangulares.	32
Figura 11. Esferas inmersas en un flujo de calor, separadas por una distancia aproximadamente el doble de su diámetro. Las esferas actúan de forma individual (sin perturbación entre ellas) dentro de una fase continua.	34
Figura 12. Esquema del Material. Donde P está formada por las esferas de poliestireno y C por el concreto.	34
Figura 13. Sistema cúbico simple empleado para distribución de esferas en las muestras de concreto.	39
Figura 14. Fracción de volumen vs separación de esferas, necesaria para la elaboración de muestras de concreto.	40
Figura 15. a) Distribución de esferas de poliestireno a distintas fracciones de volumen. A: 0.012, B: 0.024, C: 0.056, D: 0.074, E: 0.098, G: 0.15, H: 0.2. b) Sistema cúbico simple empleado en la inclusión de esferas de poliestireno en cada capa.	41
Figura 16. Curado de muestras en agua.	42
Figura 17. a) Colocado de las muestras en el equipo de Hot disk. b) Hot Disk, porta muestra.	43
Figura 18. Ajuste lineal para la muestra de concreto con pendiente $m = 14.09213$	49



Figura 19. Ajuste no lineal de la muestra de concreto para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.....	49
Figura 20. Ajuste lineal para la muestra A de fracción de volumen 0.012 con pendiente $m= 14.582$	50
Figura 21. Ajuste no lineal de la muestra A para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.....	50
Figura 22. Ajuste lineal para la muestra B de fracción de volumen 0.024 con pendiente $m= 15.737$	51
Figura 23. Ajuste no lineal de la muestra B para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.	51
Figura 24. Ajuste lineal para la muestra C de fracción de volumen 0.056 con pendiente $m= 16.064$	52
Figura 25. Ajuste no lineal de la muestra C para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.	52
Figura 26. Ajuste lineal para la muestra D de fracción de volumen 0.074 con pendiente $m= 16.305$	53
Figura 27. Ajuste no lineal de la muestra D para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.....	53
Figura 28. Ajuste lineal para la muestra E de fracción de volumen 0.098 con pendiente $m= 17.0947$	54
Figura 29. Ajuste no lineal de la muestra E para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.....	54
Figura 30. Ajuste lineal para la muestra G de fracción de volumen 0.15 con pendiente $m= 18.4061$	55
Figura 31. Ajuste no lineal de la muestra G para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.....	55
Figura 32. Ajuste lineal para la muestra H de fracción de volumen 0.2 con pendiente $m= 20.152$	56
Figura 33. Ajuste no lineal de la muestra H para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.....	56
Figura 34. Gráfica de difusividad térmica efectiva de acuerdo al modelo de Maxwell-Raileygh, variando las fracciones de volumen de 0 a 1.....	57



Figura 35. Gráfica de conductividad térmica efectiva de acuerdo al modelo de Maxwell-Raileygh, variando las fracciones de volumen de 0 a 1.	58
Figura 36. Comparación del modelo de Maxwell-Raileygh de conductividad térmica efectiva con los resultados experimentales obtenidos por la técnica de Hot Disk.	58
Figura 37. Comparación del modelo de Maxwell-Raileygh de difusividad térmica efectiva con los resultados experimentales obtenidos por la técnica de Hot Disk.	59
Figura 38. Ajuste lineal de los resultados experimentales, para determinar el umbral de error.	61
Figura 39. Flujo de calor a través del sistema de distribución cubico simple empleado en la elaboración de muestras.	62
Figura 40. a) Vista lateral de la geometría. b) Vista en planta.	64
Figura 41. Transferencia de calor en sólidos aplicado a todo el dominio del elemento.	65
Figura 42. Condición de frontera de Neumann.....	66
Figura 43. Mallado para todo el dominio de simulación.	67
Figura 44. Comparación de los resultados de simulación de conductividad térmica con el modelo.	69
Figura 45. Comparación de los resultados de simulación de difusividad térmica con el modelo.	70
Figura 46. Sistema de distribución centrado en el cuerpo.	72
Figura 47. Comparacion de los resultados de conductividad térmica con el modelo..	73
Figura 48. Comparacion de los resultados de conductividad térmica con el modelo..	74



LISTA DE NOMENCLATURA/GLOSARIO

Trabajabilidad: Definición técnica dada a la facilidad de colocación y acabado del concreto fresco.

Fraguado: Proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del concreto.

Cohesividad: Termino técnico dado al concreto cuando se encuentra en el estado plástico.

Agregado: Material granular como ser la arena y grava.

Aditivo: Son aquellas sustancias o productos (inorgánicos u orgánicos) que, incorporados al hormigón antes del amasado (o durante el mismo), producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento. (Aditivo " Adición.)

Precisión: Capacidad de un instrumento de dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones.

k: Conductividad Térmica.

α : Difusividad Térmica.

ρ : Densidad.

v: Volumen.

q: Flujo de Calor.

T: Temperatura.

∇T : Gradiente de temperatura.

h: Coeficiente de convección.

σ : Constante de Stefan-Boltzman.

A: Área.

ε : Emisividad.

e: Efusividad

Q: Calor.

m: Masa.

C: Calor específico.

Cv: Capacidad Calorífica Volumétrica.

Ce: Calor específico.

Cp: Calor específico a presión constante.

D(τ): Función tau.

r_o: Radio de sensor.

v: Fracción de Volumen.

Po: Potencia.

m_p: Pendiente.

V_T: Valor teórico.

V_E: Valor experimental.



AGRADECIMIENTOS.

Agradecimiento a mis padres, Fernando Rocha Mendoza e Irma Isabel Argote Claros por el apoyo constante durante estos años de estudio.

A mis asesores, Dr. José Antonio Calderón Arenas y Dr. Joel Hernández Wong por brindarme sus conocimientos, consejos, paciencia y amistad.

En general agradezco a todos los Doctores integrantes del CICATA Legaria, por su amistad y consejos recibidos, en especial a los doctores que fueron mis docentes en los distintos cursos como ser: Dr. Ernesto Marín, Dr. J. Bruno Rojas, Dra. Rocío Muñoz, Dra. Guadalupe Valverde y Dr. Teodoro Rivera.

Agradezco al CONACYT por la valiosa ayuda económica brindada durante los años de maestría.



DEDICATORIA

A mis padres, que con todo cariño y esfuerzo me guiaron por buen camino ayudándome a cumplir mis metas con base a la perseverancia.

A mis hermanos: Patricia, Pablo y Vivian que a pesar de la distancia siempre me apoyaron y estuvieron conmigo en los buenos y malos momentos.

A mi abuelo: René Argote, que siempre estará presente en mi corazón y en el de la familia que estuvo con él en sus últimos días.



CAPITULO 1.INTRODUCCION

En la actualidad, la necesidad operante en la industria de la construcción de crear nuevos materiales resistentes y duraderos que además reduzca el costo de operación y colocación ha llevado a la elaboración de materiales compuestos con base a cemento. Estos materiales se componen de polímeros y acero en una matriz de concreto. El concreto está formado por cemento, arena y grava, que juntos son resistentes a cargas de compresión, y gracias a los elementos ya mencionados su resistencia aumenta y además se expande a resistir cargas de tracción y flexo compresión (Adriana Valdés 2015). Sin embargo estas mejoras solo se desarrollaron para la resistencia mecánica, dejando de lado la resistencia térmica, que si bien hay un notable avance en cuanto a la elaboración de materiales constructivos refractarios, estos no son resistentes a cargas estructurales (ARQHYS 2012). Por tal motivo la idea de elaborar materiales que cumplan con las resistencias mecánicas y térmicas en nuestro medio es de gran importancia tomando en cuenta que el concreto puede fallar estructuralmente tanto por cargas mecánicas como por cambios de temperatura.

ANTECEDENTES

El concreto es una mezcla de rocas, arena, agua y cemento que al solidificarse constituye uno de los materiales de construcción más resistente para hacer bases y muros.

Propiedades térmicas de los concretos

De acuerdo con la literatura, los valores de la conductividad térmica del concreto varían de 0,35 a 1,8 W/m^{°K}, en función de la proporción de agua/cemento utilizada (ACI Committe, 1994). El rango de dicho parámetro térmico se amplía de 0.56 a 1,8 W/m^{°K} de acuerdo con el tipo de agregado.

Para predecir los valores de conducción de calor en estructuras de concreto, se debe considerar que la conductividad térmica del hormigón depende de la cantidad de agregado, granulometría y humedad de la muestra (Kim *et al*, 2003).

Las estructuras de hormigón pueden sufrir daños de tipo constructivo al momento del vaciado del hormigón fresco y daños por errores en el diseño y el cálculo de las estructuras debido a las cargas de servicio o permanentes. Es conveniente que estos daños sean detectados y caracterizados de manera oportuna y confiable. Debido al elevado costo de las reparaciones o el reemplazo de las estructuras de hormigón deficiente, se busca realizar pruebas no destructivas, confiables y eficientes, que garanticen la seguridad pública (Buyukozturk, 1998).



En los últimos años, han sido reportados diversos estudios de aplicación de técnicas no destructivas en la detección y localización de anomalías en el concreto. Comúnmente se utiliza termografía infra roja, ya que esta técnica es útil para localizar y determinar el grado de porosidad del hormigón. Este método se basa en el principio de que las anomalías en un material provocan diferencias de temperatura entre puntos localizados en el interior y la superficie, diferencias que surgen por las distintas tasas de transferencia de calor en las zonas de defectos (Inagakiet *al*, 1999).

Algunas investigaciones relacionan el porcentaje de daño con la conductividad térmica del hormigón y analizan los diferentes factores que intervienen con base en la medición de la diferencia de temperatura de dos superficies de la muestra (Delpak *et al*, 2002).

Asimismo, se reportan estudios significativos que analizan el comportamiento de las propiedades térmicas y la consistencia normal en muestras de concreto sometidas a altas temperaturas durante y posterior al fraguado (Othuman & Wang, 2011; Larsson *et al*, 2011).

Las variaciones de temperatura debidas a cambios climáticos contribuyen a la deformación de las estructuras de concreto, tanto en las direcciones longitudinales como en las transversales. Si se restringen estos movimientos, se inducirán tensiones que pueden contribuir a fisuras en dichas estructuras. Los movimientos son causados por interacciones complejas de varios factores como la radiación solar, temperatura del aire, la radiación térmica de onda larga y la velocidad del viento. Para predecir el efecto de las variaciones de temperatura en las estructuras de hormigón por agentes externos se han utilizado modelos numéricos aplicando la técnica de elementos finitos (Othuman & Wang, 2012). Así mismo, se analizaron las propiedades térmicas de pavimentos rígidos que reciben gran carga de trabajo (Shin & Upender Kodide, 2012).

La producción de materiales de aislamiento térmico y la solución de los problemas del medio ambiente mediante el reciclaje de residuos industriales y domésticos, está generando mayores dificultades. Hay muchos compuestos ligeros que contienen rellenos reciclados, incluyendo residuos de vidrio (Ducman V& Chaturvedi BK, 2002), ceniza (Varughese KTet *al*, 1996; Kearsley EP & Wainwright PJ, 2001), pastas *kraft* de sisal y residuos de plátano (Savastano *et al*, 2000), reciclado de poliestireno butadieno nitrilo acrílico (Palos, A.*et al*, 2001), escoria de acero volar (Yue YL, *et al*, 2000), ladrillos triturados ligero, ligero agregado arcilla expandida (Alduaij Jet *al*, 1999), polvo de caucho, caucho de neumáticos, llantas de fibra micronizado y residuos triturados de cables eléctricos (Bignozzi MC*et al*, 2002).

La espuma de poliestireno y sus residuos se utilizan para diversos fines (Ravindrarajah, 1999; Sayil, BM & Gurdal, E., 1999). Ravindrayah (Bajdur Wet *al*, 2002) indicó que



mediante la sustitución de 10%, 20% y 30% del agregado grueso en volumen sólido con perlas de poliestireno, la densidad del hormigón se reduce de 2.455 kg/m³ a 2.330, 2.210 y 2.080 kg/m³, respectivamente.

Las investigaciones de concretos con espumas de poliestireno mostraron que la zona de contacto de estos dos materiales es muy estrecha, sin ningún tipo de fracturas o microfisuras. La adherencia de los dos componentes depende del tamaño y la forma de gránulos utilizados (Laukaitis, A.*et al*, 2005).

Compositos a base de concreto

En la actualidad se ha puesto de manifiesto la necesidad de producir materiales con propiedades mejoradas que superen las limitaciones existentes (resistencia mecánica y térmica), tal como lo hacen los materiales reforzados. Los compositos o resinas compuestas son materiales sintéticos mezclados heterogéneamente para constituir un compuesto, como su nombre indica. Están formados por moléculas de elementos variados. Estos componentes pueden ser de dos tipos: los de cohesión y los de refuerzo. Los componentes de cohesión envuelven y unen los componentes de refuerzo manteniendo la rigidez y la posición de estos. Los refuerzos dotan al conjunto con propiedades físicas que mejoran la cohesión y la rigidez. De esta manera, esta combinación de materiales confiere al compuesto unas propiedades mecánicas notablemente superiores de las que procede (Rodríguez & Pereira, 2008).

En la combinación de materiales, se identifica una matriz o fase continua (polimérica o cerámica) que es el material mayoritario y que contiene al refuerzo (fase discreta) que puede estar en forma de partículas, láminas o fibras. Con los materiales compuestos se mejoran propiedades como resistencia mecánica, rigidez, resistencia a altas temperaturas y a la corrosión, con valores mayores que los materiales originales.

El adobe, formado por arcilla y paja, es el composito más antiguo que se conoce y que se sigue utilizando en la construcción de viviendas. Macroscópicamente, la arcilla (matriz) se distingue de la paja (refuerzo), pero la mezcla heterogénea tiene unas propiedades mecánicas mejores que las de estos componentes individuales. (José Luis Peralta)

A través de los años, con la finalidad de crear materiales resistentes tanto a cargas estructurales como a cambios de temperatura, se obtuvieron notables avances en el área de la construcción, mejorando las propiedades del concreto, obteniendo de esta forma compositos con características mejoradas. A continuación, se mencionan los compositos a base de concreto más importantes en cuanto a su aplicación en el área de la construcción civil.



Concreto polimérico

El concreto polimérico (PC) es un material compuesto muy versátil debido a su uso en construcción y reparación de estructuras, pavimentos de carreteras y puentes, tuberías de aguas residuales y estructurales, así como en paneles decorativos de la construcción. Estos materiales reforzados presentan valores más altos en propiedades como resistencia mecánica, rigidez, resistencia a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad. La ventaja de utilizar polímeros en los PC es la gran sensibilidad a cambios en los enlaces químicos que provocan valores diferentes en densidad, coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad, permeabilidad, así como la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a disolventes. Esta modificación se puede realizar mediante radiación gamma (Martínez *et al*, 2012). La resina de poliéster tiene una buena resistencia mecánica, adhesión relativamente buena con otros materiales, y buena resistencia química a la congelación y descongelación (Tavares *et al*, 2002).

Concreto con fibras

Se han realizado estudios donde se agregan fibras de polipropileno y otros materiales, por ejemplo, fibras de vidrio, carbono o acero al concreto hidráulico, observándose que efectivamente se modifican algunas propiedades del concreto hidráulico como la trabajabilidad, que resulta ser menor para concretos con fibras de polipropileno en altas proporciones de fibra (20kilogramos de fibras de polipropileno por metro cúbico de concreto hidráulico). Además de la trabajabilidad, se han observado algunas otras características del concreto hidráulico como la resistencia a la abrasión, la resistencia al impacto, resistencia a la flexión y módulo de ruptura y la tenacidad, obteniéndose variaciones en cada una de ellas (Massudet *et al*, 2004).

Concreto elaborados con Caucho

Con la finalidad de minimizar el impacto ambiental que generan los neumáticos luego de transcurrida su vida útil, surge como objetivo fundamental analizar la influencia de la adición de la raspadura de las bandas de rodamiento de los neumáticos a los compuestos de concreto, a través de ensayos destructivos y no destructivos. Los estudios sobre resistencia a la compresión y a la tracción realizada a los compuestos a la composición de 5% en peso, así como con diferentes tamaños de partícula de caucho reciclado a la edad de 28 días, indican que la adición de caucho de tamaños de partícula denominados fino y grueso disminuye estas propiedades mecánicas. En cambio, para el compuesto con 5% en peso de caucho de tamaño al azar, los valores de estas propiedades mecánicas no presentan variaciones significativas al compararlos con el concreto tradicional. Por otra parte, la velocidad de pulso ultrasónico del compuesto con partículas de caucho al azar a los 28 días de curado presenta el mismo comportamiento que el concreto tradicional. Muestran una conducta similar el módulo de elasticidad y la impedancia acústica (Camacho *et al*, 2008).



Las investigaciones de materiales compuestos a base de concreto mencionadas anteriormente, enfatizan las propiedades mecánicas del concreto dejando de lado sus características térmicas. Por tal motivo, en los últimos años se han desarrollado nuevos métodos de elaboración de composites de concreto y nuevas técnicas en la medición de las propiedades térmicas, siendo las más importantes la técnica del *Hot Disk* y la técnica de *Hot Wire*. A diferencia de la técnica de *Hot Wire* el *Hot Disk* es la técnica más práctica y eficiente debido a que se requiere una sola medición para obtener resultados de conductividad y difusividad térmica, además que las muestras empleadas no son alteradas.

El analizador de constantes térmicas *Hot Disk*

En los años sesenta, como líder de un grupo de investigación el Dr. Silas Gustafsson empieza a estudiar la conducción de calor en una base de la fuerza aérea de Patterson, Ohio, en los Estados Unidos, dando paso así a una carrera de 50 años inmerso en el estudio de propiedades térmicas. En los años ochenta contribuyó al desarrollo de equipos de prueba de conductividad térmica y estableció una compañía dedicada a elaborar equipos de pruebas térmicas. En 1989, presentó una patente para lo que se convertiría en el sistema TPS (*Transient Plane Source*).

El sistema TPS representó avances en la investigación de propiedades térmicas en sólidos, que permitieron la medición más eficiente de las propiedades de transporte térmico de los materiales. Se ensayaron una serie de materiales de construcción que abarcaban conductores térmicos a materiales térmicamente aislantes, incluyendo poliestireno extruido, metacrilato de polimetilo (PMMA), acero inoxidable y aluminio. Con la técnica del TPS mejorada para materiales sólidos, el Dr. Gustafsson desarrolló un sistema de medición con sensores de Kapton y Mica para la medición de muestras relativamente delgadas, desarrollando así la técnica de *Hot Disk*. En 1994, presentó resultados de propiedades térmicas en muestras metálicas que contenían cobre, aluminio y latón para probar la exactitud del método nuevo y mejorado. Anteriormente, este método se había utilizado para probar las propiedades térmicas de láminas metálicas delgadas, sin embargo es posible medir muestras con espesores tan pequeños como 1cm.

El disco caliente (*Hot Disk*) fue establecido en 1995, basado en tres décadas de investigación reconocida por el Dr. Silas E. Gustafsson y su grupo del departamento de física de la universidad de Chalmers, Suecia (Gustafsson, 1994).

Simulación de Procesos mediante COMSOL

La historia y la evolución de la simulación computacional han sido paralelas a la evolución de la informática. Sus orígenes los encontramos en la segunda guerra mundial, cuando dos matemáticos, J. V Neumann y S. Ulam, tenían el reto de resolver un problema complejo relacionado con el comportamiento de los neutrones. Los experimentos basados en prueba



y error eran muy costosos y el problema era demasiado complicado para abordarlo mediante técnicas analíticas. La aproximación que escogieron se basó en la utilización de números aleatorios y distribuciones de probabilidad. Este método fue llamado ‘Método de Montecarlo’ por el paralelismo entre la generación de números aleatorios y el juego de la ruleta.

A partir de la década de los sesenta, empiezan a aparecer en el mercado programas de simulación de sistemas de acontecimientos discretos que poco a poco se empezaron a utilizar para resolver problemas de ámbito civil, los más destacables fueron el GPSS de IBM (*General Purpose System Simulator*) y el SIMSCRIPT. Los modelos de acontecimientos discretos son muy utilizados en la actualidad para estudiar problemas de fabricación de procesos, logística, transporte, comunicaciones y servicios; estos problemas se caracterizan por centrar su interés en los cambios que hay en el sistema como consecuencia de los acontecimientos y en su capacidad para modelar los aspectos aleatorios del sistema.

La revolución que se produjo en la informática a partir de los años ochenta tuvo un impacto importante en la simulación computacional, haciendo que su uso se difundiera en prácticamente todos los ámbitos de la ciencia y la ingeniería, dando lugar a los programas de simulación que hoy en día ofrecen un sinnúmero de soluciones a problemas físicos y matemáticos, además de fenómenos acoplados o multifísicos como por ejemplo el sistema de simulación COMSOL *Multiphysics* (Montes, 2015).

COMSOL *Multiphysics*, antes conocido como FEMLAB, es un paquete de *software* de análisis y resolución por elementos finitos para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, en especial fenómenos acoplados o multifísicos; también ofrece una buena interfaz a MATLAB, y sus *toolboxes* proporcionan una amplia variedad de posibilidades de programación, pre procesado y postprocesado. Los paquetes de simulación del programa son multiplataforma (Windows, Mac, Linux, Unix), además de las interfaces de usuario convencionales basadas en física, COMSOL también permite modelar y solucionar sistemas acoplados de ecuaciones de derivadas parciales (EDP).

COMSOL fue fundada en julio de 1986 en Suecia por estudiantes de posgrado (Svante Littmarck y Farhad Saeidi) del profesor Germund Dahquist, a partir de los códigos desarrollados para un curso de posgrado en el Real Instituto de Tecnología en Estocolmo, Suecia.

Las primeras versiones de Comsol fueron llamadas FEMLAB y su *kernel* fue programado en el paquete matemático computacional *Matlab* y solo incluía la capacidad del análisis estructural. A medida que se iba desarrollando la plataforma se fueron incluyendo más módulos de análisis, los cuales fueron aumentando las prestaciones del paquete, pero fue hasta la versión 3.0 (noviembre de 2003) que el programa dio un giro reescribiendo el



kernel en C++. Así, al no depender de Matlab, el *kernel* de FEMLAB pudo utilizarse como servidor de computadora.

Con el lanzamiento de versiones subsecuentes, FEMLAB fue integrando más prestaciones a su interfaz, hasta que en el 2005 fue anunciado que FEMLAB sería llamado COMSOL, el cual integró una nueva herramienta llamada SCRIPT que da al usuario el poder de escribir funciones relacionadas a sus propios modelos (www.cosmol.com).

COMSOL permite el acoplamiento de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales, abreviadas como PDEs por su nombre en inglés: *Partial Differential equations*. Las PDEs pueden ser introducidas directamente o usando la llamada forma débil.

Estado del arte

Los materiales compuestos o composites surgen como respuesta a la demanda de nuevos sistemas con propiedades que son imposibles de reunir en un solo tipo de material. La definición más aceptada, aunque ligeramente ambigua, dice que “un material compuesto es un sistema material integrado por una combinación de dos o más micro o macro estructuras que difieren en forma y composición química, y que son esencialmente insolubles entre sí” (Ciencia e ingeniería de materiales 1998).

Los materiales compuestos han sido aplicados en diferentes áreas, fundamentalmente en el de ingeniería de materiales, para mejorar las características que por sí solo no tienen.

En el área de la construcción, el concreto es un material compuesto, formado de áridos, aglomerantes y, en casos excepcionales, de aditivos. Estos aditivos mejoran las características del concreto en cuanto a resistencia y trabajabilidad de la mezcla de concreto, pero deja de lado las mejoras en cuanto a sus características térmicas.

Un concreto resistente a elevadas temperaturas es un concreto especialmente de gran utilidad en industrias, ya que actualmente se utilizan materiales refractarios que por su origen y modo de fabricación no son resistentes a cargas estructurales, cosa que no pasa con el concreto. De esta manera, elaborar un concreto resistente a elevadas temperaturas y cargas estructurales es de mucha utilidad en el área de la construcción.

Para elaborar concretos resistentes a temperaturas elevadas, debemos examinar sus características térmicas y su comportamiento cuando es sometido a temperaturas excepcionales, y a cambios bruscos de la temperatura. Por “propiedad térmica” se entiende a la respuesta de un material a la aplicación de calor. En los últimos años, los estudios de las propiedades térmicas en materiales compuestos con base a concreto dieron resultados alentadores gracias a las técnicas empleadas, y han obtenido resultados de resistencia térmica de diferentes tipos de concreto con gran utilidad en el área de la construcción.

Las técnicas más empleadas en la obtención de propiedades térmicas en sólidos son la



técnica de *Hot Wire* y la técnica del *Hot Disk*, siendo esta última la más empleada en materiales de construcción. La técnica de *Hot Disk* ha sido utilizada para la obtención de propiedades térmicas de diferentes tipos de materiales como arcillas, sólidos, sólidos granulados, etc.

Utilizando la técnica del *Hot Disk* se determinó el calor específico, la conductividad térmica y la expansión térmica para tres tipos de hormigón, normal, HSC, hormigón autoconsolidante (SCC) y hormigón de cenizas volantes (FAC), en un rango de temperatura de 20 a 800 grados Celsius. También se investiga el efecto de acero, polipropileno y fibras híbridas sobre las propiedades térmicas de HSC y SCC. Los resultados de los experimentos muestran que el SCC posee mayor conductividad térmica, calor específico y expansión térmica que el HSC y el FAC en el rango de temperatura de 20-800°C. Los datos generados a partir de las pruebas se utilizan para desarrollar relaciones simplificadas para expresar diferentes propiedades térmicas en función de la temperatura. Las relaciones de propiedades térmicas propuestas pueden utilizarse como datos de entrada para evaluar la respuesta de estructuras de hormigón bajo condiciones de incendio (Kodur & Khaliq, 2010).

Continuando con los estudios de resistencia mecánica y térmica del concreto, se emplearon materiales compuestos a base de concreto autoconsolidante (SCC) y del reforzado con fibra (FRSCC) con incorporación de fibras de polipropileno y fibras de acero, buscando un concreto resistente a elevadas temperaturas y resistente a la compresión y a la tracción en el intervalo de temperatura 20-800°C.

El calor específico y la conductividad térmica se midieron utilizando el aparato de análisis térmico de temperatura Hot Disk TPS 2500S según la norma ISO/DIS 22007. Este equipo se conectó a un horno en el que una muestra se expuso a la alta temperatura deseada. Este equipo utiliza la técnica de fuente plana transitoria (TPS) para medir las propiedades térmicas de los materiales desde la temperatura ambiente hasta los 800°C.

La muestra de ensayo debe tener una distribución de temperatura uniforme durante la medición. La figura 1 ilustra un sensor de mica que se colocó entre dos muestras de hormigón en el conjunto de soporte durante la prueba. Este conjunto de soporte se colocó adicionalmente dentro del horno para exposición a altas temperaturas (Kodur & Khaliq, 2011).



Figura 1. Ilustración del sensor de mica en el ensayo de propiedades térmicas.

Los resultados experimentales de propiedades mecánicas muestran que la presencia de fibras de acero aumenta la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad de SCC a alta temperatura. También la expansión térmica de FRSCC es ligeramente mayor que la de SCC en el rango de 20-1000 °C. Los datos generados a partir de estas pruebas se utilizaron para desarrollar relaciones simplificadas para expresar las propiedades térmicas y mecánicas de SCC y FRSCC como una función de la temperatura.

Estudios recientes reportan la influencia volumétrica y naturaleza de los agregados finos ligeros sobre las propiedades térmicas y mecánicas del concreto. Realizando diferentes tipos de concreto, con diferentes dosificaciones y tipos de agregados y aplicando la técnica de *Hot disk*, se presentaron resultados sobre propiedades térmicas y mecánicas de hormigones con agregados ligeros según parámetros de mezcla. Se utilizaron siete tipos de agregados ligeros y gruesos de tres naturalezas diferentes. Los agregados en las mezclas eran una combinación de agregado grueso ligero con agregado fino. La sustitución del agregado fino por un agregado grueso ligero reduce la resistencia del hormigón, pero mejora su resistencia térmica. Los resultados del experimento permiten investigar la relación entre las propiedades mecánicas y la conductividad térmica de los hormigones estudiados con el fin de optimizar la relación resistencia / aislamiento. Se realiza una amplia gama de hormigones con agregados ligeros "aislados" cuya conductividad térmica oscila entre 0,43 y 0,73 W/mK.

Descripción del problema a resolver.

La idea de elaborar materiales compuestos resistentes a cambios de temperatura ha conducido a la búsqueda de modelos físicos para predecir los valores de sus propiedades térmicas en función de los cambios en su composición. El modelo de Maxwell-Rayleigh ha demostrado durante muchos años ser un modelo simple que permite obtener las características térmicas de materiales compuestos como la difusividad y conductividad térmica efectiva en función de la fracción en volumen de los agregados, sin embargo, una de sus principales desventajas es que requiere, para su validez, que la separación entre los



agregados sea lo suficiente para asegurar la independencia del flujo de calor a través de cada esfera. Debido a la complejidad de los desarrollos matemáticos necesarios para obtener un modelo teórico que describa en forma más realista el proceso de transporte térmico en los materiales compuestos es necesario encontrar alternativas en el análisis numérico que sustituyan la utilidad de los modelos teóricos, sobre todo en los rangos en los que estos dejan de tener validez.

Justificación:

Realizar la caracterización térmica de composites de concreto con agregados de esferas de poliestireno en función de su fracción en volumen en una disposición periódica cubica simple para demostrar la forma en que decaen los valores de las propiedades térmicas de transporte, así como de la utilidad del modelo teórico de Maxwell-Rayleigh para predecir los valores de dichas propiedades. Asimismo, demostrar la utilidad de la simulación numérica mediante COMSOL Multiphysics para predecir las propiedades térmicas de composites en situaciones en las que el modelo de Maxwell-Rayleigh deja de tener validez y la complejidad de los desarrollos matemáticos impiden obtener un modelo teórico más cercano a la realidad física del problema de transporte térmico en materiales compuestos.

Objetivo General:

Determinar el efecto de agregados de esferas de poliestireno en función de su fracción en volumen sobre las propiedades térmicas de transporte en composites de concreto, así como del rango de validez del modelo de Maxwell-Rayleigh mediante la comparación con los resultados experimentales obtenidos con el analizador de constantes térmicas *Hot Disk* y con los calculados por simulación numérica mediante COMSOL *Multiphysics*.

Objetivos Específicos:

- 1) Elaborar composites de concreto con agregados de esferas de poliestireno con diferentes fracciones en volumen.
- 2) Aplicar el analizador de constantes térmicas *Hot Disk* en la determinación de la conductividad y difusividad térmica en las muestras de composites de concreto.
- 3) Realizar la simulación numérica mediante COMSOL *Multiphysics* del flujo de calor a través de los composites de concreto y estimación de las propiedades térmicas.
- 4) Comparación de los resultados experimentales obtenidos con el analizador de constantes térmicas *Hot Disk* con los obtenidos mediante el modelo de Maxwell-



Rayleigh.

- 5) Comparación de los resultados calculados por simulación numérica con los obtenidos mediante el modelo de Maxwell-Rayleigh.

Descripción del contenido de cada capítulo.

En el capítulo 2 se describen los antecedentes, estado del arte, descripción del problema que aborda este trabajo y los objetivos.

En el capítulo 3 se describen algunos aspectos básicos de la transferencia de calor, el desarrollo de la ecuación de difusión de calor y las condiciones de frontera utilizadas en el desarrollo matemático de este trabajo.

En el capítulo 4 se describe la elaboración de las muestras de concreto, la teoría del modelo de Maxwell-Rayleigh, el procedimiento experimental mediante la técnica de Hot disk y los resultados obtenidos por esta técnica.

En el capítulo 5 se describe el procedimiento de la simulación mediante elemento finito por COMSOL y los resultados obtenidos mediante la simulación comparándolo con los resultados teóricos del modelo de Maxwell-Rayleigh y los resultados experimentales por la técnica de Hot disk.

En el capítulo 6 está dedicado a las conclusiones de esta tesis.



CAPITULO 2. FUNDAMENTOS TEORICOS.

2.1 Transferencia de calor.

Es el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están en distinto nivel energético. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

La conducción requiere contacto físico entre los cuerpos que intercambian calor, pero en la radiación no hace falta que los cuerpos estén en contacto ni que haya materia entre ellos. La convección se produce a través del movimiento de un líquido o un gas en contacto con un cuerpo de temperatura diferente.

La transferencia de calor se produce desde un objeto con alta temperatura, a otro objeto con temperatura más baja. La transferencia de calor cambia la energía interna de ambos sistemas implicados, de acuerdo con la primera ley de la termodinámica.

2.1.1 Mecanismos de transferencia de calor.

Como se mencionó anteriormente el calor se transfiere por tres mecanismos:

- Conducción.
- Convección.
- Radiación.

2.1.1.1 Conducción.

Es la transferencia de calor que se produce a través de un material por contacto directo entre sus partículas, cuando existe una diferencia de temperatura, es decir que el calor se transfiere de una parte del cuerpo con mayor temperatura a otra parte del cuerpo con menor temperatura y en virtud del movimiento de sus partículas. El medio puede ser sólido, líquido o gaseoso, aunque en líquidos y gases solo se da la conducción pura si se excluye la posibilidad de convección. La cantidad de calor que se transfiere por conducción viene dada por la ley de Fourier. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal, es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (Frank P, 1999).

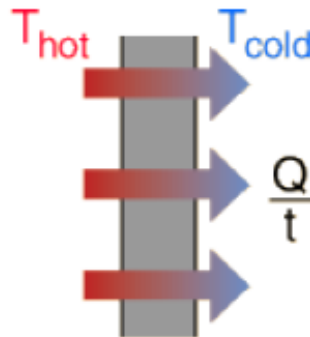


Figura 2. Transferencia de calor por conducción.

2.1.1.2 Ley de Fourier.

Esta ley establece que el flujo de calor entre dos cuerpos es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre ambos, y solo puede ir en un sentido: el calor sólo puede fluir del cuerpo más caliente hacia el más frío, es decir: la cantidad de calor que atraviesa, desde el interior hacia el exterior de una superficie isotérmica por unidad de área por unidad de tiempo en un punto es proporcional al gradiente de temperatura.

$$q = -K\nabla T(1)$$

q = Flujo de calor por unidad de superficie [W/m^2]

k = Conductividad térmica [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

∇T = Gradiente de temperatura [Km^{-1}]

2.1.1.3 Convección.

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural, producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo, el aire con un ventilador o el agua con una bomba. Solo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio. En la naturaleza, la mayor parte del calor ganado por la atmósfera por conducción y radiación cerca de la superficie, es transportado a otras capas o niveles de la atmósfera por convección.

La transferencia de calor por convección viene dada por la ley del enfriamiento de Newton:

$$H = hA(T_A - T) \quad (2)$$

donde h se llama coeficiente de convección, en $W/(m^2 \cdot K)$, A es la superficie que entrega calor con una temperatura T_A al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T , como se muestra en el esquema de la figura 3.

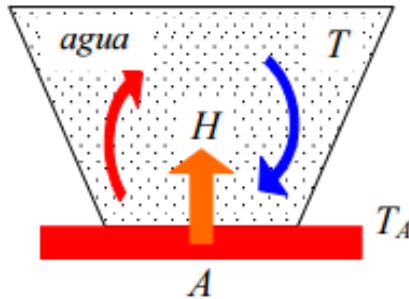


Figura 3. Proceso de Convección.

El flujo de calor por convección es positivo ($H > 0$) si el calor se transfiere desde la superficie de área A al fluido ($T_A > T$) y negativo si el calor se transfiere desde el fluido hacia la superficie ($T_A < T$) (Zunza).

2.1.1.4 Radiación.

Es la energía emitida por la materia mediante ondas electromagnéticas, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. No requiere la presencia de un medio entre el sistema y sus alrededores, lo que la hace diferente de la transferencia de calor por conducción y convección.

La razón neta de flujo de calor q_{rad} , radiado por un cuerpo rodeado por un medio a temperatura T_1 está dada por la ley de Stefan-Boltzmann.

$$\Phi_{rad} = \sigma A \varepsilon (T_2^4 - T_1^4) \quad (3)$$

Donde:

σ = Constante de Stefan-Boltzmann.

A = Área de la superficie del objeto irradiado

ε = Emisividad de la superficie a una temperatura absoluta T_2

2.2 Propiedades térmicas de las sustancias.

2.2.1 Conductividad Térmica.

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. Aunque la conductividad térmica depende de la temperatura y la



presión, es expresada como la cantidad de calor transmitido por unidad de tiempo t , por unidad de área A , y por unidad de gradiente de temperatura $\nabla T = \partial T / \partial r$.

La conductividad térmica es una propiedad muy importante a la hora de elegir el material más adecuado desde el punto de vista del aislamiento térmico. El aislamiento térmico de un cerramiento es la característica por la que se reduce el flujo de calor que espontáneamente se transfiere desde el ambiente más caliente al más frío en general, en los materiales de construcción, y especialmente en los aislantes, se requiere una baja conductividad térmica al objeto de minimizar las pérdidas de calor por las paredes de los edificios.

La conductividad térmica está determinada por la ley de Fourier (ecuación 4), que establece que el flujo de transferencia de calor en un medio isotrópico es proporcional y de sentido contrario al gradiente de temperatura en esa dirección.

Matemáticamente, la conductividad se describe por la siguiente expresión:

$$K = \frac{\vec{q}\nabla T}{\|\nabla T\|^2} \quad (4)$$

Donde $\vec{q}\nabla T$ simboliza el producto diádico.

2.2.2 Calor específico

El calor específico es la cantidad de calor que se necesita por unidad de masa para elevar la temperatura un grado Celsius. La relación entre calor y cambio de temperatura, se expresa normalmente en la forma que se muestra abajo, donde C es el calor específico. Esta fórmula no se aplica si se produce un cambio de fase, porque el calor añadido o sustraído durante el cambio de fase no cambia la temperatura.

$$Q = mC \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

Donde:

Q = Calor añadido

m = Masa [gramo].

C = Calor específico [caloría/gramo°C].

2.2.3 Capacidad calorífica molar

La capacidad calorífica molar de una sustancia se define como la relación entre la energía calorífica que absorbe y la variación de temperatura que experimenta, es decir:

$$C = \frac{1}{n} \cdot \frac{\delta Q}{dT} \quad (6)$$



Donde n es el número de moles (Ramos & Carril, 1998-1999).

2.2.4 Capacidad calorífica volumétrica

La capacidad calorífica volumétrica describe la capacidad de cierto volumen de una sustancia para almacenar calor al experimentar un cierto cambio en su temperatura sin cambiar de fase. Se diferencia del calor específico en que está determinado por el volumen del material, mientras que el calor específico está basado en la masa del material. Se puede obtener la capacidad calorífica volumétrica de una sustancia al multiplicar el calor específico por su densidad (U.S. Army, 1988).

En pocas palabras, la capacidad calorífica volumétrica se define como:

$$C_v = \rho \cdot C_e \quad (7)$$

$$C_v : [C] = \text{J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\rho: \text{Densidad } [\delta] = \text{kg/m}^3$$

$$C_e: \text{Calor específico } [C_e] = \text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

2.2.5 Efusividad térmica.

Beín y Pelzl (1989) introducen el concepto de efusividad térmica al estudiar la distribución de temperatura en un sólido semi-infinito inmerso en una atmósfera de gas calentado periódicamente en su superficie por radiación incidente modulado. De esta, deducen que valores bajos de la cantidad $\sqrt{(k\rho c)}$, llamada la **efusividad** de la muestra, conduce a altas amplitudes de oscilación de la temperatura superficial, y valores bajos de la difusividad térmica conducen a una rápida atenuación de la amplitud más allá de la superficie. Por otra parte, valores altos de la efusividad conducen a bajas amplitudes de oscilación de la temperatura superficial, y valores altos de la difusividad contribuyen a una penetración relativamente profunda de la onda térmica. Valores altos o bajos de la efusividad de sólidos normalmente combinan con valores altos o bajos de la difusividad térmica (D.P. Almond P.M. Patel, 1996). De estas consideraciones concluyen que la efusividad térmica de una sustancia da una medida de su capacidad de intercambio de calor con su entorno y por consiguiente que es una propiedad de superficie.

La efusividad térmica, denotada por e y con dimensión $\text{Ws}^{1/2}/\text{m}^2\text{k}$, da la idea de ser una cantidad más abstracta de lo que en realidad es, sin embargo, todos estamos muy familiarizados con ella. Si tocamos dos cuerpos de la misma temperatura, pero con diferentes valores de e , nos parecerá que no son igual de fríos o calientes, sino percibiremos



que uno de ellos es más frío o caliente que el otro. De acuerdo a la relación:

$$T_m = \frac{\sqrt{(k\rho c)_1 T_1 + (k\rho c)_2 T_2}}{\sqrt{(k\rho c)_1} + \sqrt{(k\rho c)_2}} \quad (8)$$

Esta expresión representa la temperatura de contacto T_m independiente del tiempo, entre dos cuerpos semi-infinitos de diferentes efusividades y diferentes valores iniciales de temperatura T_1 y T_2 , T_m es más cercano a la temperatura del cuerpo de mayor efusividad, de manera que la temperatura de contacto que sentimos es una función de la efusividad del cuerpo que tocamos.

2.2.6 Difusividad Térmica

La difusividad térmica es la razón de la conductividad térmica K y la capacidad calorífica volumétrica ρC . Representa la velocidad a la cual el calor es distribuido en un material y esta razón depende no solo de la conductividad térmica, sino también a la razón a la cual la energía puede ser almacenada.

$$\alpha = \frac{K}{\rho c} \quad (9)$$

Donde:

$$\alpha = \text{Difusividad térmica} \left[\frac{m^2}{sg} \right]$$

$$k = \text{Conductividad térmica} \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

$$\rho C = \text{Capacidad calorífica específica} \left[\frac{J}{m^3 \cdot K} \right]$$

2.2.7 Ecuación de Difusión de Calor

Haciendo uso de la ley de Fourier, considerando el sistema unidimensional mostrado en la figura 4y si la temperatura del sólido varía con el tiempo, o si en el interior del sólido hay fuentes o sumideros de calor, entonces mediante un balance de energía puedo obtener la ecuación de difusión de calor:

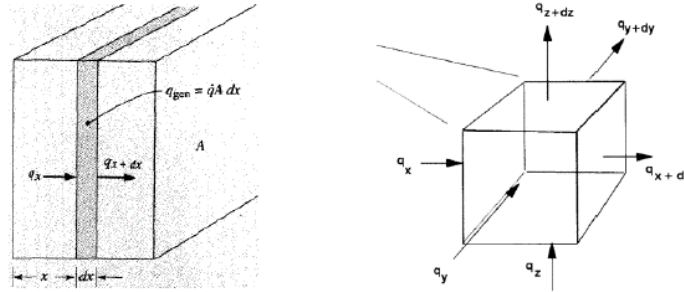


Figura 4. Volumen de control para el análisis de la conducción de calor.

2.2.8 Balance de Energía

El balance de energía viene dado de la siguiente manera:

Energía que entra por conducción a través de la cara izquierda más el calor generado en el interior del elemento es igual a la variación de la energía interna más la energía que sale por conducción a través de la cara derecha.

$$-KA \frac{\partial T}{\partial x} + qA dx = \rho c A \frac{\partial T}{\partial \tau} dx - A \left[K \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] \quad (10)$$

Esta es la ecuación de la conducción de calor unidimensional.

Donde:

$q =$ Energía generada por unidad de volumen y por unidad de tiempo, $\frac{W}{m^3}$

$c =$ Calorespecifico del material $J/Kg \cdot ^\circ C$

$\rho =$ Densidad, Kg/m^3

Para tratar el flujo se precisa considerar el calor introducido y extraído por conducción por unidad de volumen en tres coordenadas (Holman J.P, 1998).

$$q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \frac{dE}{d\tau} \quad (11)$$

La ecuación general de la conducción tridimensional de calor queda de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (12)$$

$$\nabla \cdot (K \nabla T) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (13)$$

2.2.9 Condiciones de frontera

En el tratamiento matemático las condiciones de frontera son tomadas como condiciones de limite, en la cual la temperatura T debe satisfacerse en la superficie o en el instante $t=0$. Las condiciones de frontera deben ser entendidas de tal forma que para una $t > 0$, la combinación dada de la temperatura y sus derivadas tienden al valor prescrito como aproximamos en un punto de la superficie. Las condiciones iniciales deben ser entendidas en el sentido que, para un punto fijo dentro de una región, la temperatura tiende a cero.

Para determinar la distribución de temperaturas en un medio es necesario resolver la forma apropiada de la ecuación de calor. Sin embargo, esta solución depende de las condiciones físicas que existan en las fronteras del medio y, si la situación depende del tiempo, también dependerá de las condiciones que existan en el medio en algún tiempo inicial.

Existen cuatro tipos de condiciones de frontera.

2.2.9.1 Condición de frontera de *dirichlet*

Corresponde a una situación en la que la superficie se mantiene a una temperatura fija T_s .

Se aproxima mucho, por ejemplo, cuando la superficie está en contacto con un sólido que se funde o con un líquido en ebullición. En ambos casos hay transferencia de calor a la superficie, mientras que la superficie permanece a la temperatura del proceso de cambio de fase.

Matemáticamente, las condiciones de frontera de este tipo se pueden expresar de la siguiente manera:

$$y(\mathbf{x})|_{S \in \Gamma} = g_D(S) \quad (14)$$

Donde f es una función que toma valores de la frontera Γ del dominio Ω

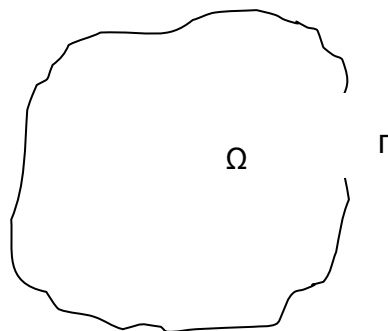


Figura 5. Condición de frontera de dirichlet.

Cuando el valor de la temperatura T_s es conocido en una parte de $\delta\Omega_T$ de la frontera Ω se tiene:

$$T = T_s \text{ en cualquier punto de } \delta\Omega_T$$

2.2.9.2 Condición de frontera de Neumann

Corresponde a la existencia de un flujo de calor fijo o constante en la superficie. Este flujo de calor se relaciona con el gradiente de temperatura en la superficie mediante la ley de Fourier (Incropera & De Witt, 1996).

Matemáticamente se expresa como:

$$\left. \frac{\partial}{\partial \hat{n}} y(x) \right|_{s \in \Gamma} = g_N(s) \quad (15)$$

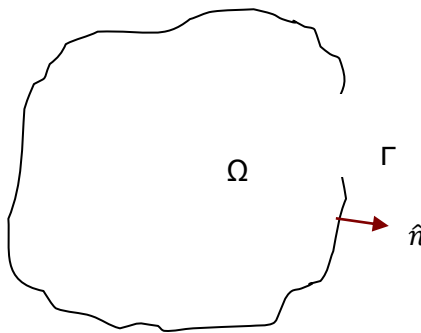


Figura 6. Condición de frontera de Neumann.

Cuando una densidad de flujo q en una porción $\delta\Omega_T$ de la frontera Ω se expresa de la siguiente manera:

$$(-K \cdot \nabla T) \cdot n = -q(s) \text{ En todo punto de } \delta\Omega_T$$

Esta condición denota:

Una condición adiabática ($q=0$).

Una condición de simetría ($q=0$ en el plano de simetría).

2.2.9.3 Condición de frontera de Robin

Corresponde a la existencia de calentamiento (o enfriamiento) por convección de la superficie.

Matemáticamente se expresa:

$$a y(x) + b \left. \frac{\partial}{\partial \hat{n}} y(x) \right|_{s \in \Gamma} = g_R(s) \quad (16)$$

Establece una combinación lineal de condiciones de frontera de Dirichlet y Neumann

$$\phi \cdot \vec{n} = (-K \cdot \nabla T) \cdot \vec{n} = -q(T) \quad (17)$$

Intercambio convectivo de forma $q(T) = h(T_{ext} - T)$

Intercambio radiactivo en un medio infinito $q(T) = \sigma \varepsilon (T_{\infty}^4 - T^4)$

2.2.9.4 Condición de frontera de Cauchy

Se expresa de la siguiente manera:

$$y(x)|_{s \in \Gamma} = h(s) \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial \vec{n}} y(x) \Big|_{s \in \Gamma} = r(s)$$

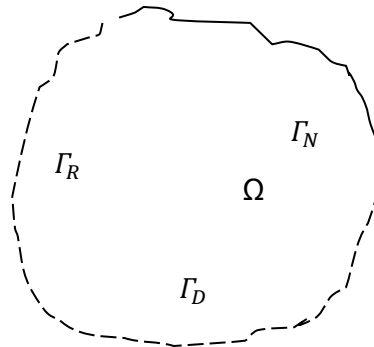


Figura 7. Condición de frontera de Cauchy.

Se puede considerar como una combinación de las condiciones de frontera de Dirichlet, Neumann y Robin.

2.3 Características del concreto

El concreto es una mezcla de cemento, agregados finos, agregado grueso, aire y agua en proporciones adecuadas para obtener ciertas propiedades prefijadas, especialmente la resistencia.

El cemento y el agua reaccionan químicamente uniendo las partículas de los agregados, constituyendo un material heterogéneo.

Las características o propiedades básicas del concreto son:

- Trabajabilidad



- Cohesividad
- Resistencia Mecánica.
- Durabilidad
- Temperatura

2.3.1 Trabajabilidad

Es la facilidad que presenta el concreto fresco para ser mezclado, colocado, compactado y acabado sin segregación y exudación durante estas operaciones (Abanto F.).

La facilidad de colocación, consolidación y acabado del concreto fresco y el grado que resiste a la segregación se llama trabajabilidad. El concreto debe ser trabajable pero los ingredientes no deben separarse durante el transporte.

El grado de trabajabilidad que se requiere para una buena colocación del concreto se controla por los métodos de colocación, tipo de consolidación y tipo de concreto. Los diferentes tipos de colocación requieren diferentes niveles de trabajabilidad.

Los factores que influyen en la trabajabilidad del concreto son:

- El método y la duración del transporte.
- Cantidad y características de los materiales cementantes.
- Consistencia del concreto (asentamiento en cono de Abrams o revenimiento)
- Tamaño, forma y textura superficial de los agregados finos y gruesos.
- Aire incluido (aire incorporado).
- Cantidad de agua.
- Temperatura del concreto y del aire.
- Aditivos.

La distribución uniforme de las partículas de agregado y la presencia de aire incorporado ayudan considerablemente en el control de la segregación y en la mejoría de la trabajabilidad.

Las propiedades relacionadas con la trabajabilidad incluyen consistencia, segregación, movilidad, bombeo, exudación y facilidad de acabado. La consistencia es considerada una buena indicación de trabajabilidad. El asentamiento en cono de Abrams se usa como medida de la consistencia y de la humedad del concreto

Un concreto de bajo revenimiento tiene una consistencia rígida o seca. Si la consistencia es muy seca y rígida, la colocación y compactación del concreto serán difíciles y las partículas más grandes de agregados pueden separarse de la mezcla. Sin embargo, no debe suponerse que una mezcla más húmeda y fluida es más trabajable. Si la mezcla es muy húmeda, pueden ocurrir segregación y formación de huecos. La consistencia debe ser lo más seca



posible para que aún se permita la colocación empleándose los equipos de consolidación disponibles. (IMCYC, 2004).

2.3.2Cohesividad

La cohesividad se define como aquella propiedad gracias a la cual es posible controlar la posibilidad de segregación durante la etapa de manejo de la mezcla, al mismo tiempo que contribuye a prevenir la aspereza de la misma, y facilitar su manejo durante el proceso de compactación del concreto.

Normalmente se considera que una mezcla de concreto posee el grado apropiado de cohesividad si ella no es demasiado plástica ni demasiada viscosa, es plástica y no segrega fácilmente.

En una pasta de cemento-agua, la cohesividad se incrementa cuando la relación agua-cemento alcanza valores distintos para luego empezar a disminuir.

La cohesividad se incrementa con aumentos en la fineza de las partículas de la mezcla.

2.3.3Durabilidad

El ACI define la durabilidad del concreto de cemento como la habilidad para resistir la acción de la intemperie, el ataque químico, la abrasión, y cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras, que produzcan deterioro del concreto(*American Concrete Institute, 2005*).

La conclusión primordial que se desprende de esta definición es que la durabilidad no es un concepto absoluto que dependa solo del diseño de mezcla, sino que está en función del ambiente y las condiciones de trabajo a las cuales lo sometamos.

En este sentido, no existe un concreto “durable” por sí mismo, ya que las características físicas, químicas y resistentes que pudieran ser adecuadas para ciertas circunstancias, no necesariamente lo habilitan para seguir siendo “durable” bajo condiciones diferentes.

Los siguientes son los factores que afectan la durabilidad del concreto:

- Congelamiento y descongelamiento
- Ambiente químicamente agresivo
- Abrasión
- Corrosión de metales en el concreto
- Reacciones químicas en los agregados

Existen factores que influyen en la durabilidad, clasificados desde el punto de vista del



mecanismo de ataque al concreto y que representan subdivisiones y análisis más profundos que los ya mencionados (reacciones no ácidas, ácido carbónico en el agua, ataque de sales de magnesio, agresión de grasas animales etc.) pero que no trataremos en el presente capítulo por estar más relacionados con la investigación académica de estos fenómenos que con su trascendencia práctica, ya que la frecuencia de ocurrencia de tales agentes es muy aislada.

2.3.4. Resistencia

La resistencia del concreto es la propiedad más apreciada por los ingenieros de control de calidad. En los sólidos, existe una relación inversa fundamental entre la porosidad (la parte de huecos en el volumen) y la resistencia. Por consecuencia en materiales de múltiples fases como el concreto, la porosidad de la estructura de cada componente puede convertirse en un límite a la resistencia. La resistencia de un material se define como la habilidad para resistir esfuerzos sin fallar. La falla se identifica algunas veces con la aparición de grietas. Sin embargo, debe hacerse notar que a diferencia de la mayoría de los materiales estructurales, el concreto contiene grietas finas aun antes de estar sujeto a esfuerzos externos. En el concreto por lo tanto, la resistencia se relaciona con el esfuerzo requerido para causar fractura y es sinónimo del grado de falla en el que el esfuerzo aplicado alcanza su valor máximo. En las pruebas de tensión, la fractura de la pieza probada generalmente significa falla; en la compresión, la pieza probada se considera que ha fallado cuando, no habiendo señas de fractura externa visibles, el agrietamiento interno es tan avanzado que el espécimen es incapaz de soportar una carga mayor sin fracturarse.

Los agregados que componen el concreto contribuye a la resistencia del mismo, por tal motivo siempre es importante hacer una dosificación previa ya que la misma proporciona las cantidades adecuadas de agregado fino y grueso, así como también las cantidades de cemento y agua. Una buena dosificación es sinónimo de calidad y resistencia a la hora de preparar concreto fresco.

Un concreto con una resistencia ideal será aquel que soporte cargas estructurales de compresión, tracción y temperatura de acuerdo a las especificaciones técnicas para el cual ha sido elaborado.(Kumar Metha y Paulo Monteiro)

2.3.5 Temperatura.

Las propiedades térmicas del concreto son de gran importancia para el desarrollo de gradientes de temperatura, deformaciones térmicas y aislamiento térmico proporcionado por el concreto en servicio. El conocimiento de la expansión térmica del concreto se requiere en el diseño de juntas de expansión y contracción y en el diseño de estructuras estáticamente indeterminadas sujetas a variación de temperatura (A.M. Neville).



La conductividad térmica del concreto depende de su composición es decir, depende del tipo de agregado y la cantidad de agua utilizado en la mezcla. La relación agua cemento tiene gran importancia en la conductividad térmica, ya que a mayor cantidad de agua menor es el valor de conductividad térmica. La conductividad es poco afectada por la temperatura del medio ambiente. A temperaturas más altas, la variación de conductividad es compleja. Aumenta lentamente con un aumento de la temperatura hasta un máximo de 50 a 60 °C. Con la pérdida de agua del concreto a medida que la temperatura aumenta hasta 120 °C (M. Mamillan), la conductividad decrece notablemente.

La difusividad térmica del concreto de igual manera que la conductividad se ve afectada por el contenido de humedad, que depende del contenido de agua de la mezcla y el tipo de agregado empleado. El rango de valores típicos de difusividad del concreto está entre 0.002 y 0.006 m²/h. (J. M. Scanlon and J. E. McDonald).

El calor específico, el cual representa la capacidad térmica del concreto, es poco afectado por los tipos de agregados, pero aumenta con el contenido de humedad del concreto. El calor específico aumenta con la temperatura y con la disminución de la densidad del concreto (Whiting, A. Litvin and S. E. Goodwin). El rango de valores comunes está entre 840 y 1170 J/kgK.

Las propiedades térmicas en el concreto se pueden determinar de varios métodos o técnicas por ejemplo por el método de placas calientes o por métodos transitorios como ser las técnicas de Hot Disk y Hot Wire.

2.4 El analizador de constantes térmicas *Hot Disk*.

El sistema del Hot disk es un instrumento basado en el Plano de Fuente Transitoria (TPS), una técnica patentada muy apreciada por su capacidad para determinar, simultáneamente, conductividad térmica, difusividad térmica y el calor específico de rápida medición. El método del disco caliente (*Hot-disk*) es un método experimental diseñado para la estimación de la conductividad térmica y la difusividad térmica de muestras sólidas. Este método se basa en el calentamiento de una fuente plana de doble espiral resistiva intercalada entre dos muestras de material de dimensiones máximas de 7cm de diámetro y con espesor mayor a 1cm y menor a 4cm.(Constructor Civil, 2011).

Considerando un disco caliente de n anillos concéntricos de un material resistivo, la temperatura T del disco sometido a una salida de potencia total φ_0 puede ser descrito como (Gustafsson, 1991):

$$T(t) = \frac{\varphi_0}{\pi^{3/2} r_0 \lambda} D_n(\tau) (19)$$



Con $\tau = \sqrt{\frac{\alpha t}{r^2}}$, donde α es la difusividad térmica de la muestra, λ es la conductividad térmica de la muestra y r_0 es el radio del disco caliente y:

$$D_n(\tau) = [n(n+1)]^{-2} \int_0^\tau \sigma^{-2} d\sigma \times \left[\sum_{l=1}^n l \sum_{K=1}^n K \exp\left(-\frac{l^2 + K^2}{4n^2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{lK}{2n^2\sigma^2}\right) \right] \quad (20)$$

Donde n es el número concéntrico de anillos resistivos del disco caliente, I_0 es la función de Bessel modificada del primer tipo de orden cero.

Si el espacio entre los anillos resistivos se vuelve muy delgado, esta solución tiende hacia

$$D_\infty(\tau) = \int_0^\tau \sigma^{-2} d\sigma \int_0^1 v dv \int_0^1 u du \times \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{4\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{uv}{2\sigma^2}\right) \quad (21)$$

El cálculo numérico de $D_n(\tau)$ y $D_\infty(\tau)$ no es posible cerca de cero (por $\tau < 0,03$), porque las relaciones (20) y (21) conducen a un límite infinito cuando τ tiende a cero.

Al asumir el ancho de los anillos concéntricos resistivos infinitamente pequeños, las relaciones (20) y (21) no permiten una buena representación de las variaciones de temperatura del disco caliente en tiempos muy cortos. De hecho, uno puede ver que la anchura de los anillos resistivos no aparece en estas dos relaciones.

Mediante el cálculo de $D_n(\tau) - D_n(0.03)$ y $D_\infty(\tau) - D_\infty(0.03)$ y utilizando un polinomio de grado 6 de la siguiente manera:

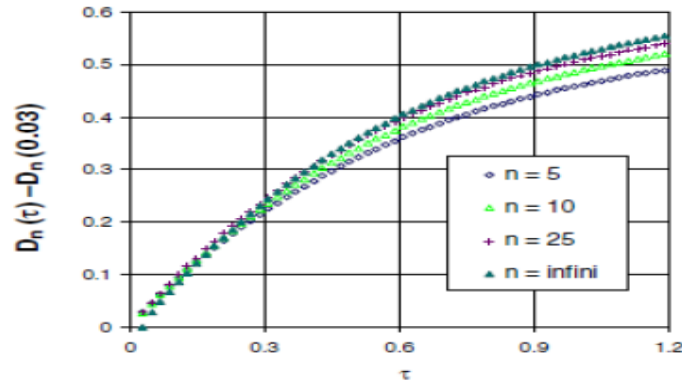
$$P_n(\tau) = b_0 + b_1\tau + b_2\tau^2 + b_3\tau^3 + b_4\tau^4 + b_5\tau^5 + b_6\tau^6 \quad (22)$$

Deducimos que:

$$D_n(\tau) = P_n(\tau) + D_n(0.03)$$

Y como $D_n(0) = 0$, entonces:

$$D_n(\tau) = D_n(0.03) + b_0 + b_1\tau + b_2\tau^2 + b_3\tau^3 + b_4\tau^4 + b_5\tau^5 + b_6\tau^6 \quad (23)$$


 Figura 8. Funciones $D_n(\tau) - D_n(0.03)$.

La tabla 1 y la figura 8 presentan, respectivamente, los coeficientes de cada polinomio y las curvas representativas de las funciones correspondientes. Se puede observar que el coeficiente b_1 tiende a 1 para un número infinito de anillos resistivos (flujo uniforme). Luego, en un corto tiempo, tenemos $D_\infty(\tau) \approx D_\infty(0.03) + b_0 + \tau$

$$\begin{aligned}
 T(t) &= \frac{\varphi_0 [D_n(0.03) + b_0 + \tau]}{\pi^{3/2} r_0 \lambda} = \frac{\varphi_0 \left[D_n(0.03) + b_0 + \sqrt{\frac{\alpha t}{r_0^2}} \right]}{\pi^{3/2} r_0 \lambda} \\
 &= \frac{\varphi_0}{\pi r_0^2 \sqrt{\pi E}} \sqrt{t} + \frac{\varphi_0 [D_n(0.03) + b_0]}{\pi^{3/2} r_0 \lambda} \quad (23)
 \end{aligned}$$

Considerando un flujo uniforme, tenemos que encontrar la ecuación de placa caliente a corto tiempo. Por lo tanto, se deduce que para un número infinito de anillos resistivos $b_0 = -D_\infty(0.03)$. Con un número finito de anillos n concéntricos resistivos, la función $D_n(\tau)$ se conoce sólo para $\tau > 0.03$:

$$D_n(\tau) = C_0 + b_0 + b_1 \tau + b_2 \tau^2 + b_3 \tau^3 + b_4 \tau^4 + b_5 \tau^5 + b_6 \tau^6 \quad (24)$$

donde C_0 es una constante desconocida que no afecta a la forma de la curva de $D_n(\tau)$, simplemente provoca un desfase de tiempo constante en $T(t)$ proporcional al φ_0 e inversamente proporcional a λ .

Esta solución ha sido establecida para una sonda con masa despreciable y una resistencia de contacto (R_c) entre la sonda y la muestra.

Tomando en cuenta la resistencia de contacto R_c , se supone que después de un cierto tiempo el efecto de la resistencia de contacto consiste simplemente en un cambio constante de la temperatura en comparación con el modelo ideal (Gustafsson, 1991). Con su hipótesis se puede escribir (Guarachi F. 2016).

$$T(t) = \frac{\varphi_0}{\pi^{3/2} r_0 \lambda} D_n(\tau) + R_C \varphi_0 \quad (25)$$

	n=5	n=8	n=10	n=16	n=25	n=32	n= ∞
b ₁	0.9596	0.9055	0.9141	0.9386	0.9564	0.9638	0.9967
b ₂	-1.0872	-0.5393	-0.4942	-0.4812	-0.4837	-0.4861	-0.4986
b ₃	1.5965	0.1211	-0.03290	-0.1322	-0.1703	-0.1828	-0.2257
b ₄	-1.9920	-0.08165	0.1206	0.2561	0.3123	0.3319	0.4006
b ₅	1.3271	0.1215	-0.00358	-0.08452	-0.1178	-0.1295	-0.1708
b ₆	-0.3437	-0.0462	-0.01610	0.002431	0.009822	0.01243	-0.02165

Tabla 1. Coeficientes de los valores de los polinomios $D_n(\tau)$ - $D_n(0.03)$

Las mediciones pueden ser llevadas a cabo en muchos materiales diferentes (sólidos, líquidos, polvos, materiales viscosos, materiales compuestos incluyendo varios tipos de geometría y dimensiones. También se puede utilizar bajo diversas condiciones ambientales: de muy baja temperatura (-45°C) hasta 1000°C, gracias a baños de circulación y hornos de alta temperatura.

El disco caliente tiene la ventaja de que funciona sin ningún tipo de calibración. Para llevar a cabo un experimento solo hay que colocar la muestra en el soporte de muestras y especificar los parámetros. Al tratarse de un experimento no destructivo permite el uso de las mismas muestras para otro análisis.

Por otra parte, el dispositivo es transportable y perfectamente integrado a su entorno. Puede ser utilizado tanto para aplicaciones industriales y de laboratorio.

Para llevar a cabo las mediciones con la técnica de *Hot disk* es necesario revisar el correcto funcionamiento de los siguientes equipos:

Sensores

El sensor de *Hot Disk*, en su núcleo, es una doble espiral aislada de níquel que se utiliza para lecturas precisas de temperatura. El material aislante hace que el sensor sea mecánicamente estable y muy duradero, y el uso de níquel metal en la espiral hace que las mediciones de conductividad térmica sean muy precisas. Para adaptarse a diferentes tipos de materiales y geometrías de muestras, se dispone de sensores con radios de 0,5 mm hasta 30 mm. Además, el material de aislamiento de los sensores puede ser Kapton (ver figura 9),

mica o Teflón para hacer frente a diferentes rangos de temperatura y condiciones extremas.

TPS

Esta técnica como se mencionó anteriormente es ideal para pruebas de sólidos, líquidos, polvos, pastas y espumas. La marca de alta precisión también lo hace el instrumento adecuado para la prueba de control de calidad.

A través de los años, la técnica TPS ha sido mejorada y ofrece mayor confiabilidad en los resultados.

	TPS500	TPS1500	TPS2500
Conductividad termica (W/mk)	0,03-100	0,01-400	0,005-500
Difusividad Termica (mm ² /sg)	0,02-40	0,01-100	0,01-100
Capacidad calorifica especifica	0,10-4,5	0,10-5,0	0,10-5,0
Tiempo de medicion (sg)	2,5-2560	20-1280	1-1280
Repetitividad	2-3%	1-2%	1-2%
Exactitud	5-10%	2-5%	2-5%
Rango de temperatura (°C)	-40 a +200	-40 a +1000	-40 a +1000
Estandar	No hay norma	ISO / DIS 22007 a 2,2	ISO / DIS 22007 a 2,2

Tabla 2. Prestaciones técnicas. Diferentes modelos de TPS.

La modificación de la técnica TPS a través de los años hacen que en un plazo corto se llevan a cabo las mediciones de conductividad térmica, difusividad térmica y capacidad de calor específico.

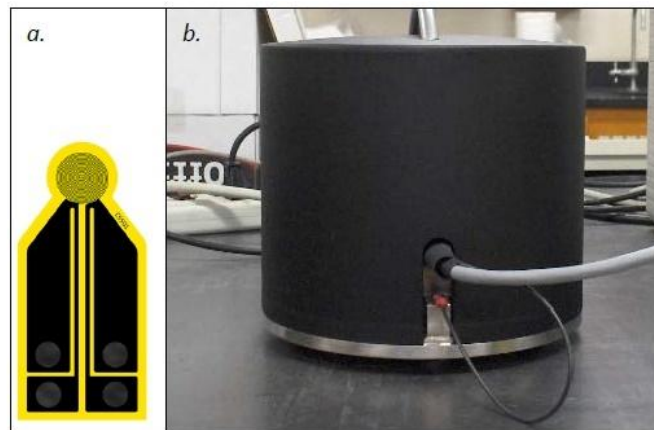


Figura 9. A. Diseño de sensor 5501, b. Hot disk con el soporte y tapa.



Aplicaciones de la técnica *Hot disk*

Materiales de construcción: En el sector de la construcción, el estudio del comportamiento térmico mediante la técnica *Hot disk* permite un control rápido y continuo de aislamiento térmico de materiales.

Industria: El aumento de la productividad está estrechamente vinculado a un buen conocimiento de los fenómenos térmicos durante el proceso de manufactura.

Aeronáutica: desempeño térmico de los composites.

El diseño sostenible: caracterización térmica de los materiales aislantes naturales,

El equipo puede participar en el desarrollo de biomateriales tales como fibras naturales; estudiar la influencia de la anisotropía (ladrillos o madera) y la influencia de la humedad en las propiedades térmicas de la madera.

2.5 Simulación de procesos mediante COMSOL Multiphysics

COMSOL proporciona soluciones de *software* para el modelado multifísicos en un paquete de análisis y resolución por elementos finitos para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente fenómenos acoplados, o multifísicos. COMSOL Multiphysics también ofrece una gestionada interfaz a MATLAB y sus *toolboxes* que proporcionan una amplia variedad de posibilidades de programación, preprocesado y postprocesado. También proporciona una interfaz similar a COMSOL Script. Los paquetes son multiplataforma (Windows, Mac, Linux, Unix). Además de las interfaces de usuario convencionales basadas en físicas, COMSOL Multiphysics también permite entrar sistemas acoplados de ecuaciones en derivadas parciales (EDP). Las EDP se pueden entrar directamente o utilizando la llamada forma débil (Dahlquist, G., 2005).

2.5.1 Módulos

Los siguientes son los módulos del programa Comsol:

- *AC/DC Module*
- *Acoustics Module*
- *Electrochemistry Module*
- *Electrodeposition Module*
- *Geomechanics Module*
- *Heat Transfer Module*
- *Microfluidics Module*
- *Molecular Flow Module*
- *Nonlinear Structural Materials Module*
- *Semiconductor Module*



- *Structural Mechanics Module*
- *Subsurface Flow Module*

2.5.2 Simulación.

Para desarrollar el experimento en el programa de simulación, se dividió el trabajo en tres grupos, esto para dar una secuencia lógica al desarrollo del trabajo experimental:

- Pre-Procesamiento
- Procesamiento
- Post-Procesamiento

2.5.2.1 Pre-Procesamiento.

Se refiere al modelado del sistema físico, es decir la geometría y los materiales, la definición de parámetros, funciones y variables, así como de las ecuaciones diferenciales parciales que describen el sistema físico y el proceso de mallado.

- Geometría

Se establece la forma geométrica de la simulación, puede estar en 1D, 2D, 3D según el problema físico.

Antes de establecer la geometría es aconsejable tener el sistema de unidades bien definidas.

- Materiales

El programa almacena varios tipos de materiales, así como también sus propiedades físicas, el material empleado para este caso es el hormigón y el poliestireno, el programa muestra la conductividad y la difusividad térmica de estos materiales.

- Física

La definición de la física en el proceso de simulación describe todos los fenómenos que ocurren en el modelo, una descripción más amplia puede ser encontrada en el desarrollo matemático de la simulación.

- Mallado

Es la discretización del dominio, es decir la geometría se divide en n elementos de dominio los cuales se interconectan entre sí por medio de nodos. Como se puede suponer, se dispone de elementos específicos en cada dimensión, un ejemplo se puede observar en la figura 10.

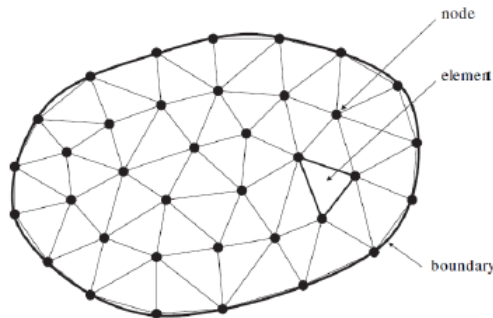


Figura 10. Mallado de dominio con elementos triangulares.

Cuando se malla un dominio, es importante verificar el número de elementos generados ya que un mayor número de ellos requiere una mayor cantidad de cálculos, lo que implica mayor procesamiento y por tanto más espacio de memoria.

2.5.2.2 Procesamiento.

En este paso se da solución a las EDP mediante elemento finito manejando las características del estudio (estado estacionario, dependiente del tiempo, frecuencia, etc.). En este paso se pueden configurar los *solvers*, los tiempos de cada paso, el empleo de opciones para sistemas altamente no lineales, etc.

a) Estudio

Se refiere a la especificación del tipo de dependencia temporal del problema, es decir si el problema es estacionario o dependiente del tiempo.

La especificación de la dependencia temporal permite seleccionar el tipo de motor de resolución a utilizar, el método de solución, el número de paso a realizar, las tolerancias del error, el número de iteraciones y si el problema es altamente no lineal.

2.5.2.3 Post-Procesamiento.

Es la obtención y visualización de los resultados obtenidos por el procesamiento. Estos datos pueden ser interpretados mediante gráficas, diagramas, flechas y tablas.

- Resultados

Una vez que el *solver* encuentra una solución a las ecuaciones diferenciales parciales descritas en la física, esta se muestra en forma gráfica, según sea la dimensión del problema en volúmenes, superficies o gráficas. También se pueden derivar expresiones con las variables dependientes calculadas y graficarlas en una, dos y hasta tres dimensiones.



CAPITULO 3. DETERMINACION DE PROPIEDADES TERMICAS EN COMPOSITOS DE CONCRETO CON AGREGADOS DE ESFERAS DE POLIESTIRENO.

3.1 Introducción.

La técnica empleada para la determinación de propiedades térmicas es la técnica de Hot disk con el sistema TPS 2500 que permite medir muestras solidas con dimensiones mayores a 10 mm de espesor y menores de 70 mm de diámetro. La técnica consiste en inducir un flujo de calor constante a través de un sensor tipo Kapton en medio de dos muestras sólidas, en este caso las muestras son compositos de concreto con inclusión de esferas de poliestireno. La técnica de Hot Disk permite obtener resultados de conductividad, difusividad térmica y calor específico volumétrico a partir de la medición de la variación de la temperatura con el tiempo. Los valores de las propiedades térmicas referidas se obtienen mediante el ajuste del modelo teórico a los resultados experimentales.

Como las muestras analizadas son materiales compuestos, es útil y conveniente comparar los resultados experimentales con los obtenidos a partir de modelos que describan de la forma más realista posible la fenomenología del proceso de transferencia de calor a través de la muestra de composito. Por tal motivo se utiliza el modelo de Maxwell-Rayleigh debido a los modelos teóricos simplificados que se obtiene de la conductividad y difusividad térmica efectiva para materiales compuestos.

3.2 Modelo Maxwell-Rayleigh.

El modelo de maxwell se basa en la teoría del electromagnetismo, más precisamente en la conducción de corriente en un medio heterogéneo, que es análoga a la conducción de calor mediante la ley de Fourier que permite obtener ecuaciones de conductividad y difusividad térmica efectiva en medios heterogéneos.

El modelo de Maxwell-Rayleigh para medios heterogéneos con flujo de calor constante debe respetar el espacio mínimo de las esferas inmersas en un medio continuo, que debe ser superior al diámetro de las mismas (ver figura 11.), con base a la suposición de independencia de cada esfera.

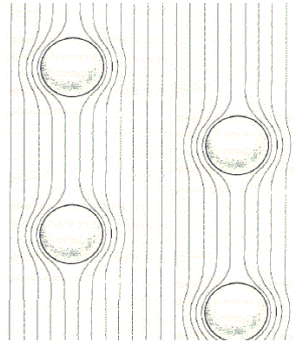


Figura 11. Esferas inmersas en un flujo de calor, separadas por una distancia aproximadamente el doble de su diámetro. Las esferas actúan de forma individual (sin perturbación entre ellas) dentro de una fase continua.

Mediante este modelo, aplicando la ley de Fourier, podemos determinar la conductividad térmica y la difusividad térmica efectiva de materiales compuestos.

Según el modelo, la conductividad térmica efectiva de un medio heterogéneo o región compuesta 1 que consiste de pequeñas esferas de conductividad k_p inmersas en un medio continuo de conductividad k_c (ver figura 12.) está dada por (Hummel, R. E., Morrone, *et al*, 1993, p. 2771-2773.)

:

$$k = k_c \frac{2(1-v) + (1+2v)\lambda_{pc}}{2+v+(1-v)\lambda_{pc}} \quad (26)$$

Donde k representa la conductividad térmica efectiva, k_p la conductividad térmica del poliestireno, k_c la conductividad térmica del concreto, v la fracción de volumen de las esferas de poliestireno y $\lambda = k_p/k_c$

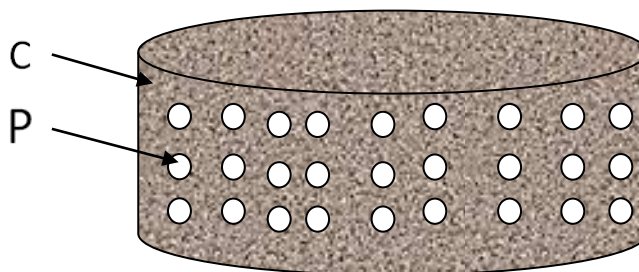


Figura 12. Esquema del Material. Donde P está formada por las esferas de poliestireno y C por el concreto.



En nuestro caso el material compuesto tiene una capacidad calorífica efectiva dada por:

$$v_i \rho_i c_i = v_p \rho_p c_p + v_c \rho_c c_c \quad (27)$$

Denotando v_i , ρ_i y c_i el volumen, la densidad y el calor específico de la componente i -ésima del sistema.

Sustituyendo estas en la expresión que define a la difusividad térmica:

$$\alpha = \frac{K}{\rho c} \quad (28)$$

Donde ρ es la densidad del material, entonces podemos escribir la difusividad térmica del material compuesto en términos de las propiedades de los materiales p y c como la siguiente ecuación: (Hummel, R. E., Morrone, *et al*, 1993, p. 2771-2773.)

$$\alpha = \alpha_c \frac{2(1-v) + (1+2v)\lambda_{pc}}{[2+v+(1-v)\lambda_{pc}][1-v+v\left(\frac{\lambda_{pc}\alpha_c}{\alpha_p}\right)]} \quad (29)$$

Siendo α la difusividad térmica efectiva α_p y α_c la difusividad térmica del poliestireno y el concreto, v la fracción de volumen de esferas de poliestireno y λ_{pc} la razón entre la conductividad térmica del poliestireno y el concreto k_p/k_c

3.3 Procedimiento experimental.

Las muestras analizadas son composites de concreto de 55mm de diámetro y 20mm de espesor con relación agua/cemento de 0.52 en las cuales se introdujeron esferas de poliestireno de 2 mm de diámetro a diferentes concentraciones de volumen de 0, 0.012, 0.024, 0.056, 0.074, 0.098, 0.15 y 0.2, siendo la fracción 0 la muestra de hormigón sin inclusión de esferas. Las muestras de composites a base de concreto fueron elaboradas siguiendo las siguientes normas:

- ACI (*American Concrete Institute*)
- Norma Española EHE-08
- Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-204
- ASTM

Una vez elaborada las muestras de concreto se procede a determinar las propiedades térmicas mediante la técnica de Hot Disk, utilizando un sensor tipo Kapton de 3.189 mm de radio y 8 anillos concéntricos y una potencia de salida de 0.2 Watts.



3.3.1 Elaboración de muestras.

Esta parte abarca dos pasos fundamentales que son:

- Dosificación.
- Preparación de Muestras.

3.3.1.1 Dosificación.

Para obtener un concreto con las características deseadas de consistencia y durabilidad, la norma ACI recomienda hacer una dosificación previa a la elaboración de especímenes o muestras de concreto. La dosificación implica establecer las proporciones apropiadas de los materiales que componen el concreto, a fin de obtener la resistencia y durabilidad requeridas, o bien, para obtener un acabado correcto.

Deben seguir ciertas condiciones como se indica en la tabla siguiente (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2006).

Tipo de Condición	Características que deben considerarse		Parámetros condicionantes
Diseño	Resistencia		Tipo de cemento
			Relación agua/cemento
Uso	Trabajabilidad:	Fluidez	Dosis de agua
		Consistencia	Granulometría
	Características del elemento		Tamaño Máximo
Durabilidad	Condiciones ambientales		Tipo de cemento
	Ataques agresivos		Dosis mínima de cemento

Tabla 3. Condiciones generales para dosificación.

Para obtener las proporciones adecuadas para las muestras de concreto con inclusión de esferas de poliestireno, dividiremos el trabajo en dos grupos.

- Dosificación de la pasta de concreto.
- Calculo de la fracción de volumen y separación de esferas de poliestireno.

Dosificación de la pasta de concreto.

Se tomara en cuenta solo las proporciones de material que componen el concreto como ser las cantidades de agua, arena, grava y cemento.



El tipo de dosificación empleada es la aproximada debido al tamaño de las muestras y de los agregados, siguiendo la distribución 1:2:3 (cemento: arena: grava) recomendada por las normas ACI.

Dosificación Aproximada

Este tipo de dosificación requiere las propiedades físicas de los materiales y tipo de concreto

Propiedades físicas de los materiales

Materiales	Peso específico gr/cm ³	% Humedad	% Absorción	Peso Unitario gr/cm ³	
				Compactado	Suelto
Agua	1				
Cemento	2.860				
Grava	2.620	0.500	2.500	1.695	1.580
Arena	2.650	3.500	1.650	1.640	1.530

Tabla 4. Propiedades físicas de materiales empleados.

Tipo de Concreto.

Se utilizó el H-21, por ser el más común y usado en los elementos estructurales. Este tipo de concreto tiene las siguientes características:

Resistencia característica: 210kg/cm²

Densidad del concreto: 2400 kg/m³

Cálculo.

Para 1m³ de concreto.

Cemento: Una bolsa de cemento pesa 50kg

Según dosificación 1:2:3, para un cubo de hormigón corresponden 7 bolsas

Entonces: 50kg x 7 = 350kg

Agua:

Relación agua / cemento = 0.52

Entonces: 0.52 x 350 = 180 lts.

Áridos:

Peso de áridos (P_a):

$$P_a: \rho_c \cdot v - P_{cem} - Agua$$

Donde ρ_c es la densidad del concreto por volumen, P_{cem} es el peso del cemento.

$$P_a = 2400 * 1 - 350 - 180 = 1870 \text{ kg}$$

Suponiendo: 35% arena: 655 kg

65% grava: 1215 kg

La proporción de materiales para un metro cúbico (1 m^3) de hormigón es la siguiente:

Material	Cantidad
Agua	180 lts
Cemento	350 kg
Arena	655 kg
Grava	1,215 kg

Tabla 5. Proporciones de material.

Como las muestras para obtener las propiedades térmicas del concreto mediante la técnica de *Hot disk* tienen un volumen 47.51 cm^3 , la proporción de agregado es la siguiente:

Material	Cantidad
Agua	11 ml
Cemento	20 gr
Arena	37 gr
Grava	69 gr

Tabla 6. Proporciones de material para muestras de 47.51 cm^3 .

Cálculo de la fracción y separación de esferas de poliestireno.

Las esferas de poliestireno tienen 2 mm de diámetro y están colocadas por capas dentro de las muestras de concreto, haciendo variar las cantidades de acuerdo a las fracciones de volumen empleadas. La separación de esferas se calculó de la siguiente manera:

Utilizando un diagrama de cuerpo cúbico simple (figura 13) se determinó la separación de esferas de poliestireno según la fracción de volumen de esferas requerida:

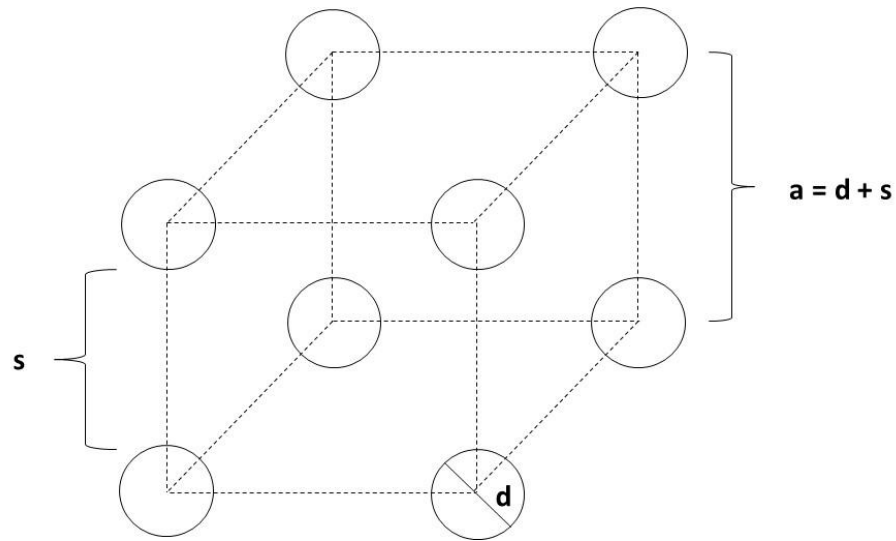


Figura 13. Sistema cúbico simple empleado para distribución de esferas en las muestras de concreto

Volumen del cubo (V_c)

$$V_c = a^3$$

$$a = d + s$$

$$V_c = (d + s)^3$$

Volumen de las esferas de poliestireno (V_e)

$$V_e = \frac{4}{3} \pi r^3$$

Reescribiendo en función del diámetro

$$V_e = \frac{\pi}{6} d^3$$

La fracción de volumen (δV) en un sistema cubico simple es la siguiente:

Ecuación IV.5. Fracción de volumen dependiendo de la separación de esferas

$$\frac{V_e}{V_c} = \frac{\frac{\pi}{6} d^3}{(d + s)^3} = \frac{\pi}{6} \left(\frac{d}{d + s} \right)^3 = \frac{\pi}{6} \left(\frac{1}{1 + \frac{s}{d}} \right)^3 = \frac{\frac{\pi}{6}}{\left(1 + \frac{s}{d} \right)^3}$$

$$v = \frac{\pi}{6(1+s/d)^3} (30)$$

De esta manera se calcula la fracción de volumen de las esferas de poliestireno en las muestras de concreto. Graficando la ecuación se obtiene una gráfica que relaciona la fracción de volumen y la separación de esferas de poliestireno (figura 14).

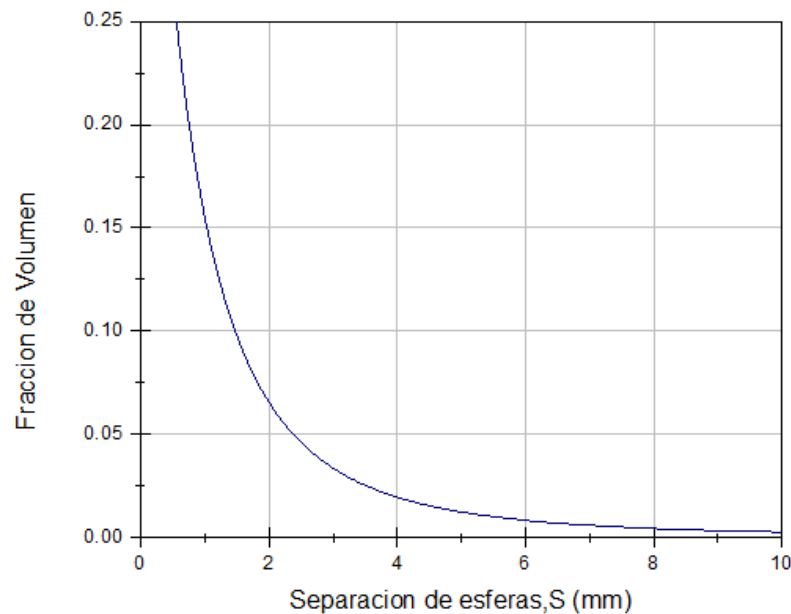


Figura 14. Fracción de volumen vs separación de esferas, necesaria para la elaboración de muestras de concreto.

Una vez obtenidas las cantidades apropiadas de agregados, agua, cemento y cantidad de esferas de poliestireno se procede a la preparación de muestras de concreto.

3.3.1.2 Preparación de muestras de concreto.

Se elaboraron muestras de compositos de concreto con inclusión de esferas de poliestireno, empleando cemento Tolteca CEMEX, agregados pétreos triturados (arena y grava) y esferas de poliestireno de 2 mm de diámetro. Las muestras de compositos fueron realizadas cumpliendo las especificaciones técnicas de la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE-204 y la norma ASTM (American Society for Testing and Materials). Con base a estas normas para la verificación de la calidad de los agregados que componen el concreto se utilizaron los siguientes ensayos:

- NMX-C-030-1997-ONNCCE / ASTM C-702: Obtención y preparación de muestras
- NMX-C-077-1997-ONNCCE / ASTM C-136: Granulometría.
- NMX-C-414-ONNCCE / ASTM C-184: Finura del cemento Portland.

Una vez verificada la calidad de los materiales que componen el concreto, se elaboraron especímenes cilíndricos, siguiendo el procedimiento de la norma NMX-C-061-ONNCCE / ASTM C-31/ASTM C-192 (Preparación y curado de especímenes de ensayo). Donde en cada capa se incorporan esferas de poliestireno a diferentes fracciones de volumen (tabla 7), utilizando el sistema de distribución cúbico simple (Figura 15 y 16)

Muestra	Fracción de Volumen
A	0.012
B	0.024
C	0.056
D	0.074
E	0.098
G	0.15
H	0.2

Tabla 7. Muestras de composites de concreto con diferentes fracciones de volumen.

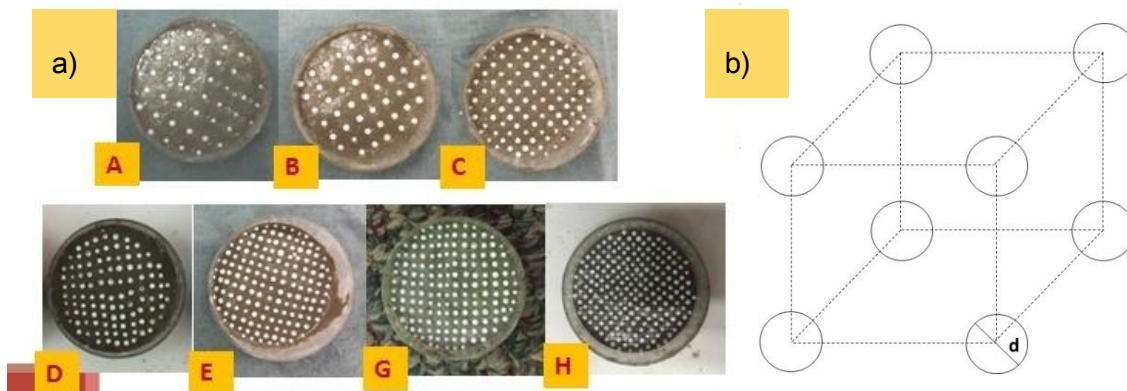


Figura 15. a) Distribución de esferas de poliestireno a distintas fracciones de volumen. A: 0.012, B: 0.024, C: 0.056, D: 0.074, E: 0.098, G: 0.15, H: 0.2. b) Sistema cubico simple empleado en la inclusión de esferas de poliestireno en cada capa.



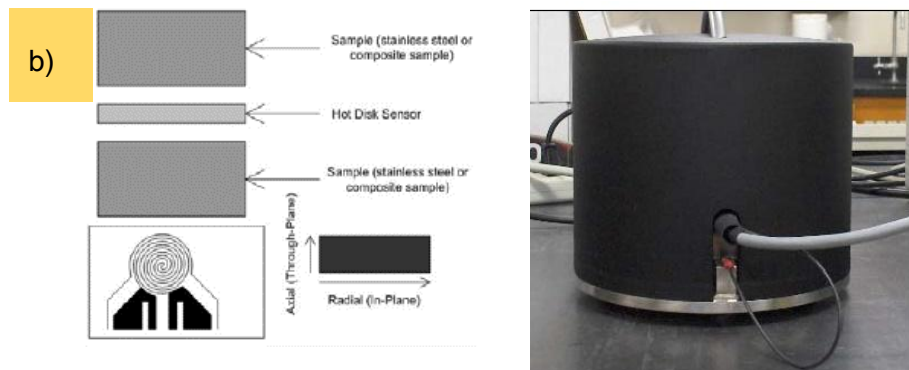
Figura 16. Curado de muestras en agua.

Una vez pasado los 28 días de fraguado indicado por la norma NMX-C-061-ONNCCE / ASTM C-31/ASTM C-192 se procede a realizar ensayos al concreto endurecido, siendo para este caso los ensayos de propiedades térmicas.

3.1.2 Experimento mediante la técnica de *Hot Disk*.

La técnica del disco caliente es una tecnología emergente que utiliza la técnica de fuente plana transitoria para medir la conductividad térmica en el plano y a través de un material anisotrópico (Bohac, V. *et al*, 2000, Demirboga. R. & Kan, A. 2012, p. 730-734).

El sensor utilizado para este experimento es de tipo Kapton. Este sensor actúa tanto como una fuente de calor para aumentar la temperatura de la muestra y un termómetro de resistencia para la grabación del aumento de temperatura dependiente del tiempo. El sensor se coloca en medio de dos muestras de concreto (figura 17.a)



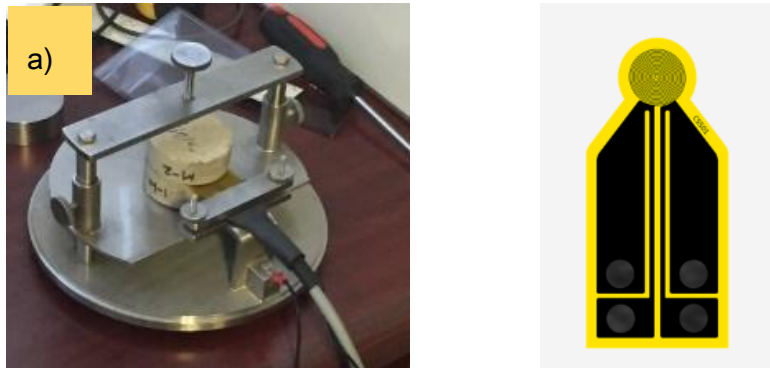


Figura 17. a) Colocado de las muestras en el equipo de Hot disk. b). Hot Disk, porta muestra.

Una vez teniendo las muestras en posición se cubre con un porta muestras para evitar los efectos de convección (ver figura 17.b) y se procede a señalar los parámetros de medición como (Manual de Hot disk).

- Temperatura externa
- Tipo de sensor
- Diámetro de sensor
- Potencia de salida
- Tiempo de medición.

Para el ensayo se utilizan los siguientes parámetros:

Parámetros	Valor	Unidades
Temperatura externa	24	°C
Tipo de sensor	Kapton	
Diámetro de sensor	3.189	mm
Potencia de salida	0.2	W
Tiempo de medición	25	segundos

Tabla 8. Parámetros de ensayo de la Técnica Hot Disk.

El tiempo de medición va a depender del tiempo de fraguado del hormigón ya que a menor tiempo de fraguado corresponderá mayor tiempo de ensayo, esto se debe a que la muestra de concreto aun no alcanzo su resistencia máxima.

Una vez colocado los parámetros ya mencionados se procede a realizar el ensayo dando como resultados las características térmicas del composito de concreto.



3.2 Resultados.

En primera instancia la técnica da resultados de conductividad y difusividad térmica con base a los parámetros ya mencionados (tabla 8), luego se hace una corrección mediante la función tau (τ) y la temperatura a través del tiempo para obtener resultados reales de las propiedades térmicas del material.

Corrección de la Conductividad térmica.

La corrección se realiza mediante un ajuste lineal y la ecuación (19)

$$T(t) = \frac{P_0}{\frac{3}{\pi^2 r_0 k}} D_n(\tau) \text{ Donde } \tau = \sqrt{\frac{\alpha t}{r_0^2}}$$

Despejando k obtenemos la siguiente ecuación:

$$k = \frac{P_0}{\frac{3}{\pi^2 r_0 T(t)}} D_n(\tau) = \frac{P_0}{\frac{3}{\pi^2 r_0 m}} \quad (31)$$

Siendo P_0 la potencia de salida en Watts, r_0 el radio del sensor y m_p la pendiente de la recta de ajuste.

Corrección de la difusividad térmica.

De acuerdo con el polinomio

$$D_n(\tau) = D_n(0.03) + b_0 + b_1\tau + b_2\tau^2 + b_3\tau^3 + b_4\tau^4 + b_5\tau^5 + b_6\tau^6$$

Y los valores de b de la tabla 1, para un sensor de 8 anillos, la corrección de la difusividad es la ecuación siguiente:

$$y = 0.90557 \sqrt{\frac{Ax}{r_0^2}} - 0.5393 \frac{Ax}{r_0^2} + 0.1211 \sqrt{\frac{Ax}{r_0^2}}^3 - 0.08165 \left(\frac{Ax}{r_0^2}\right)^2 + 0.1215 \sqrt{\frac{Ax}{r_0^2}}^5 - 0.04620 \left(\frac{Ax}{r_0^2}\right)^3 \quad (32)$$

Donde A es el parámetro de la difusividad térmica, x es el tiempo. Con el ajuste se encuentra la difusividad térmica.

La corrección de la conductividad térmica y difusividad térmica se realizan para cada resultado obtenido por la técnica de Hot disk de las muestras A, B, C, D, E, G y H. (figuras 18-33)



Cada muestra fue medida un total de 5 veces, luego se realizó estudios estadísticos para determinar la incertidumbre en las medidas, por esta razón los resultados mostrados a continuación son típicos medidos en primera instancia de conductividad y difusividad térmica dado por la técnica *Hot disk* son:

Muestra de Concreto.

Parameters : Hormigon Number of Rows: 1

File:	Temperature °C	Outp.power. [W]	Meas.time [s]	Radius [mm]	TCR
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\HORMIGON.hot	24	0.2	25	3.189	0.0047

Results : Hormigon Number of Rows: 1

File:	(Points)	Temperature °C	Th.Conductivity W/mK	Th.Diffusivity $10^{-6} m^2/s$	Spec.Heat
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\HORMIGON.hot	(24- 200,tc)	24	0.826611721	0.56152101	1.47209402

Muestra A.

Parameters : composito A Number of Rows: 1

File:	Temperature, °C	Outp.power. W	Meas.time,[s]	Radius [mm]	TCR
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\A1-B1.hot	24	0.2	25	3.189	0.0047

Results : composito A

File:	(Points)	Fraccion de volumen	Temperature °C	Th.Conductivity W/mk	Th.Diffusivity $10^{-6} m^2/s$	Spec.Heat
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\A1-B1.hot	(24- 200,tc)	0.012	24	0.802308919	0.525831655	1.52579045

Muestra B.

Parameters : composito B Number of Rows: 1

File:	Temperature	Outp.power.	Meas.time	Radius	TCR
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\B1-B2\B1-B2.hot	24	0.2	25	3.189	0.0047



Results : composito B

File:	(Points)	Fraccion de volumen	Temperature °C	Th.Conductivity W/mk	Th.Diffusivity $10^{-6} m^2/s$	Spec.Heat
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\B1-B2\B1-B2.hot	(5- 190,tc)	0.024	24	0.730253797	0.510770532	1.42971012

Muestra C.

Parameters : composito C Number of Rows: 1

File:	Temperature	Outp.power.	Meas.time	Radius	TCR
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\C1-C2\C1-C2.hot	24	0.2	25	3.189	0.0047

Results : composito C

File:	(Points)	Fraccion de volumen	Temperature °C	Th.Conductivity W/mk	Th.Diffusivity $10^{-6} m^2/s$	Spec.Heat
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\C1-C2\C1-C2.hot	(11- 195,tc)	0.056	24	0.723937425	0.520568809	1.39066616

Muestra D.

Parameters : composito D Number of Rows: 1

File:	Temperature	Outp.power.	Meas.time	Radius	TCR
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\D1-D2\D1-D2.hot	24	0.2	25	3.189	0.0047

Results : composito D

File:	(Points)	Fraccion de volumen	Temperature °C	Th.Conductivity W/mk	Th.Diffusivity $10^{-6} m^2/s$	Spec.Heat
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\D1-D2\D1-D2.hot	(28- 200,tc)	0.074	24	0.687836574	0.492414407	1.39686525



Muestra E.

Parameters : composito E Number of Rows: 1

File:	Temperature	Outp.power.	Meas.time	Radius	TCR
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\E1-E22\E1-E2.hot	24	0.2	25	3.189	0.0047

Results : composito E

File:	(Points)	Fraccion de volumen	Temperature °C	Th.Conductivity W/mk	Th.Diffusivity 10 ⁻⁶ m ² /s	Spec.Heat
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\E1-E22\E1-E2.hot	(25- 200,tc)	0.098	24	0.690165437	0.507602796	1.35965649

Muestra G.

Parameters : composito G Number of Rows: 1

File:	Temperature	Outp.power.	Meas.time	Radius	TCR
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\0.15\New	24	0.2	25	3.189	0.0047

Results : composito G

File:	(Points)	Fraccion de volumen	Temperature °C	Th.Conductivity W/mk	Th.Diffusivity 10 ⁻⁶ m ² /s	Spec.Heat
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\SEM3\ENSAYO26-10-2016\0.15\New	(40- 200,tc)	0.15	24	0.641998389	0.466558143	1.37603083

**Muestra H.**

Parameters :		composito	H	Number of Rows: 1	
File:	Temperature	Outp.power.	Meas.time	Radius	TCR
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\New Folder\H.hot	24	0.2	25	3.189	0.0047

Results :		composito	H			
File:	(Points)	Fraccion de volumen	Temperature °C	Th.Conductivity W/mk	Th.Diffusivity $10^{-6} m^2/s$	Spec.Heat
C:\hotd2006\Hotdisk.Fernando\New Folder\H.hot	(26- 190,tc)	0.2	24	0.584060577	0.449329522	1.29984911

En resumen los resultados experimentales medidos por la técnica de Hot Disk es la siguiente:

Muestra	ν	k W/m ^o k	α 10 ⁻⁶ m ² /s
Concreto	0	0.827±0.02	0.562±0.02
A	0.012	0.802±0.015	0.525±0.015
B	0.024	0.730±0.026	0.511±0.026
C	0.056	0.723±0.027	0.520±0.025
D	0.074	0.687±0.020	0.492±0.022
E	0.098	0.690±0.024	0.507±0.022
G	0.15	0.642±0.015	0.467±0.020
H	0.2	0.584±0.025	0.450±0.025

Tabla 9. Resultados experimentales por la técnica de Hot Disk.

Por otra parte utilizando el modelo corregido de la referencia (Yves Janont and Zoubir Acem), los resultados de conductividad y difusividad térmica son las siguientes:

Concreto.

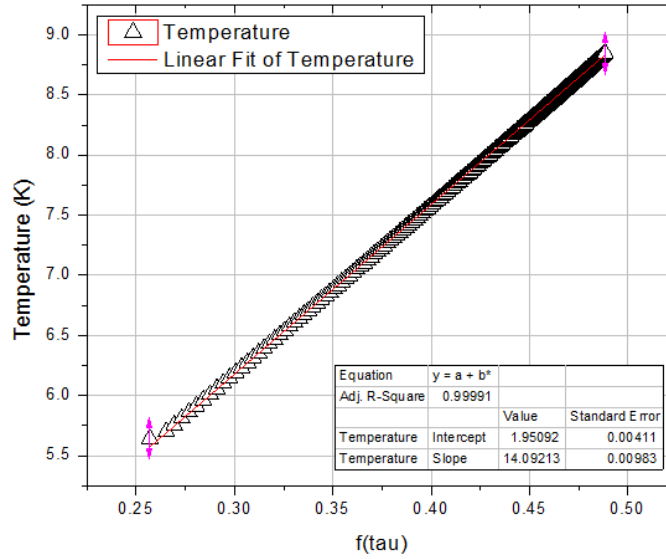


Figura 18. Ajuste lineal para la muestra de concreto con pendiente $m = 14.09213$

Reemplazando los valores en la ecuación 31 se obtiene la conductividad térmica corregida

$$k = 0.800 \pm 0.02 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$$

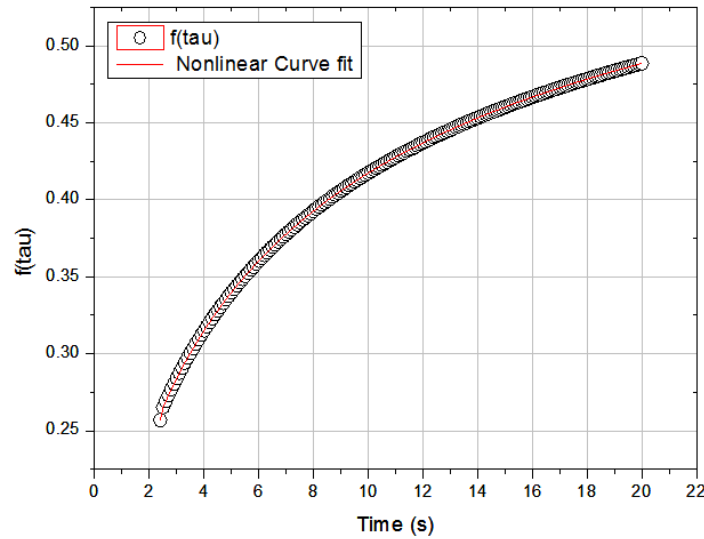


Figura 19. Ajuste no lineal de la muestra de concreto para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.

La difusividad térmica es:

$$\alpha = 0.550 \pm 0.02 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Muestra A. Corrección de la Conductividad Térmica

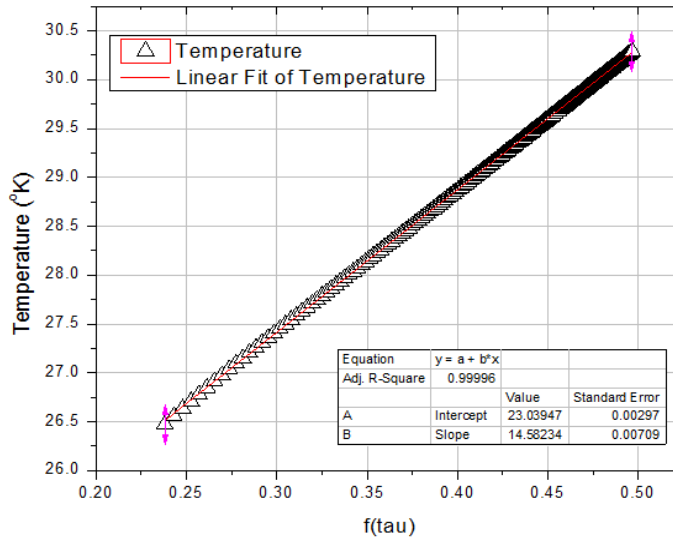


Figura 20. Ajuste lineal para la muestra A de fracción de volumen 0.012 con pendiente $m=14.582$.

Reemplazando los valores en la ecuación 31 se obtiene la conductividad térmica corregida

$$k = 0.773 \pm 0.025 \text{ W/m}^\circ\text{K}$$

Corrección de la difusividad térmica.

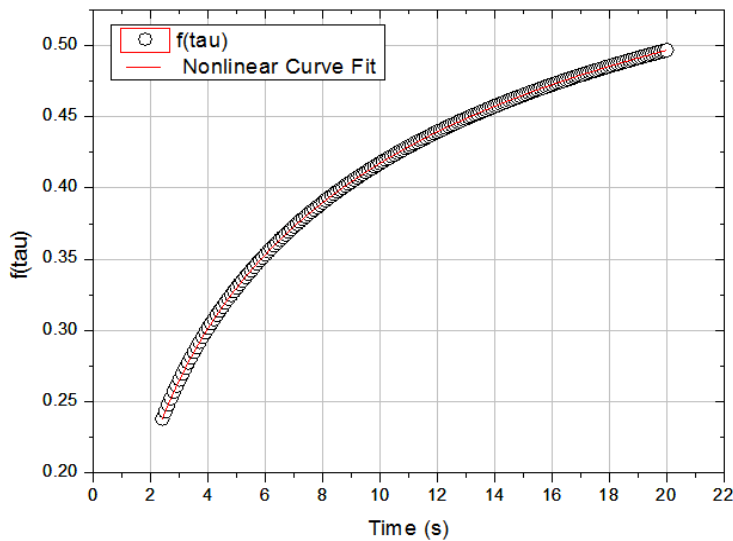


Figura 21. Ajuste no lineal de la muestra A para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.

La difusividad térmica es:

$$\alpha = 0.545 \pm 0.025 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Muestra B. Corrección de la conductividad térmica.

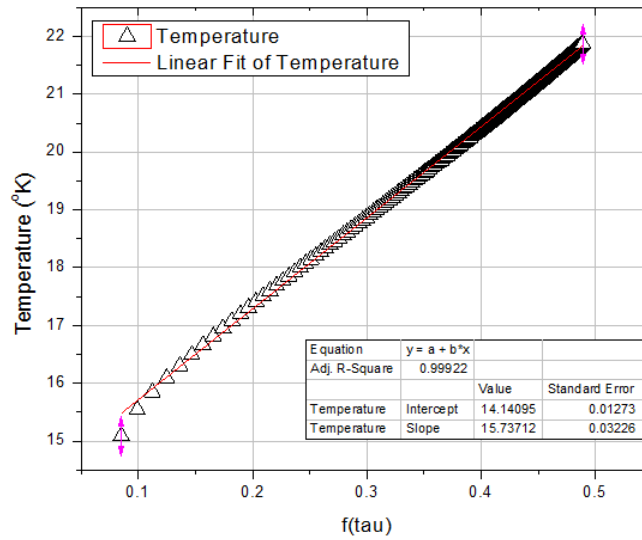


Figura 22. Ajuste lineal para la muestra B de fracción de volumen 0.024 con pendiente $m=15.737$.

La conductividad térmica corregida es:

$$k = 0.716 \pm 0.03 \text{ W/m}^\circ\text{K}$$

Corrección de la difusividad térmica.

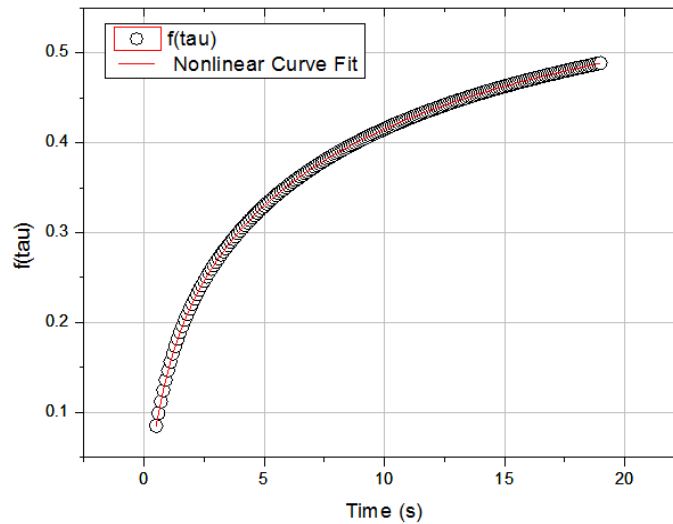


Figura 23. Ajuste no lineal de la muestra B para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.

La difusividad térmica es:

$$\alpha = 0.524 \pm 0.03 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Muestra C. Corrección de la conductividad térmica.

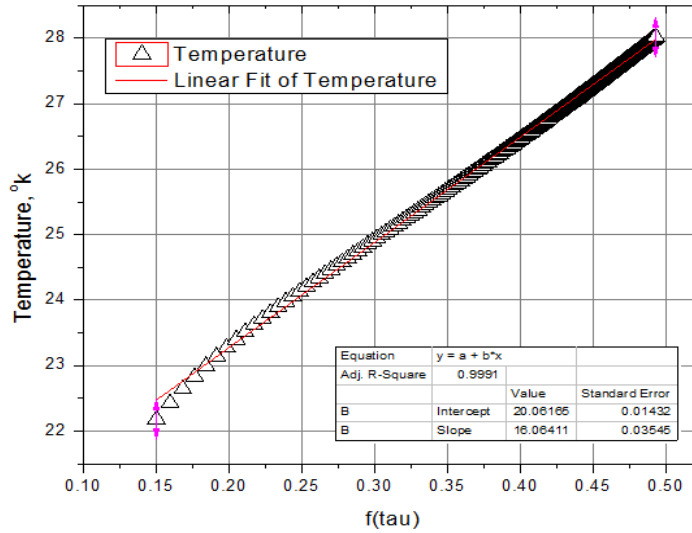


Figura 24. Ajuste lineal para la muestra C de fracción de volumen 0.056 con pendiente $m=16.064$.

La conductividad térmica corregida es:

$$k = 0.715 \pm 0.025 \text{ W/m}^\circ\text{K}$$

Corrección de la difusividad térmica.

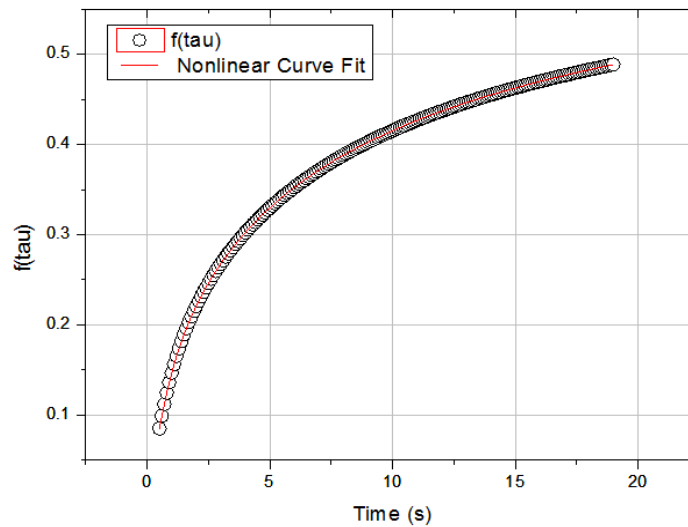


Figura 25. Ajuste no lineal de la muestra C para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.

La difusividad térmica es:

$$\alpha = 0.502 \pm 0.025 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Muestra D. Corrección de la conductividad térmica.

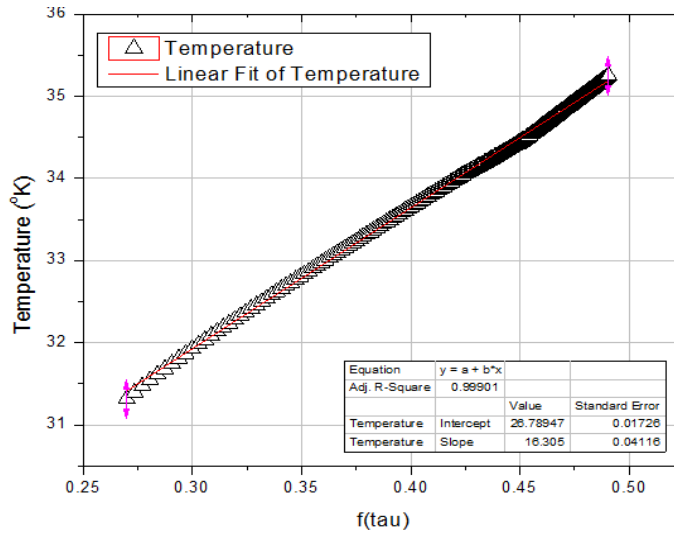


Figura 26. Ajuste lineal para la muestra D de fracción de volumen 0.074 con pendiente $m=16.305$

La conductividad térmica corregida es:

$$k = 0.690 \pm 0.025 \text{ W/m}^\circ\text{K}$$

Corrección de la difusividad térmica.

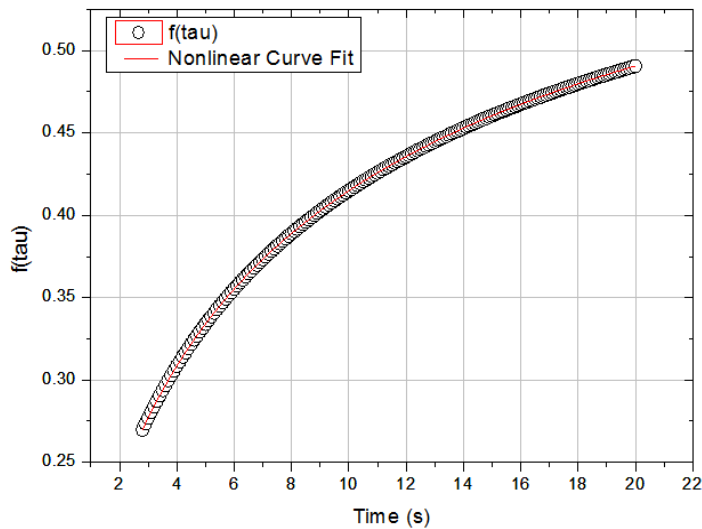


Figura 27. Ajuste no lineal de la muestra D para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.

La difusividad térmica es:

$$\alpha = 0.501 \pm 0.025 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Muestra E. Corrección de la conductividad térmica.

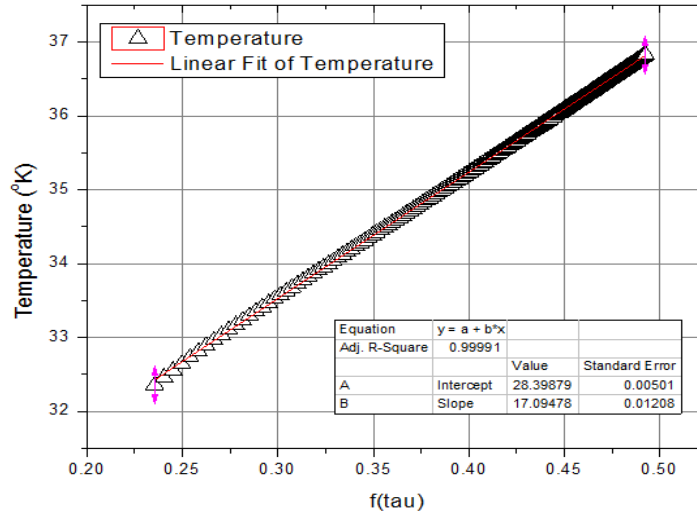


Figura 28. Ajuste lineal para la muestra E de fracción de volumen 0.098 con pendiente $m=17.0947$.

La conductividad térmica corregida es:

$$k = 0.660 \pm 0.03 \text{ W/m}^0\text{K}$$

Corrección de la difusividad térmica.

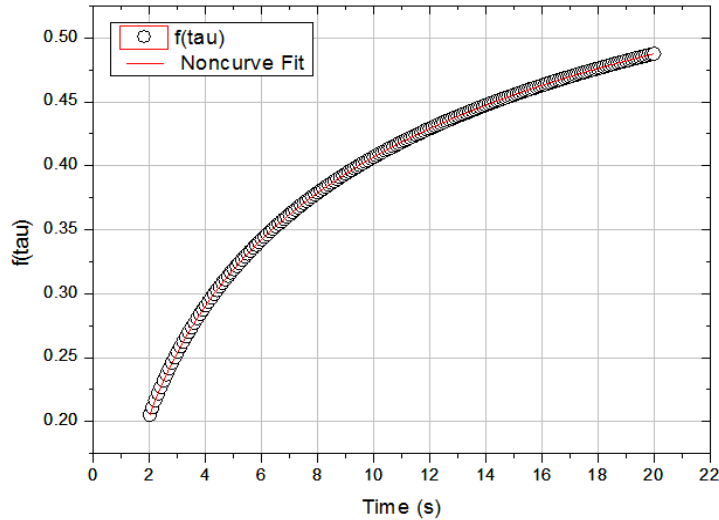


Figura 29. Ajuste no lineal de la muestra E para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.

La difusividad térmica es:

$$\alpha = 0.492 \pm 0.03 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Muestra G. Corrección de la conductividad térmica.

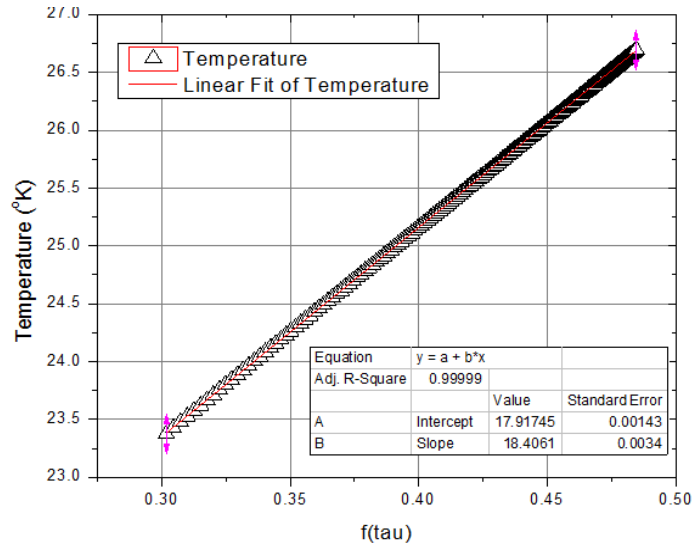


Figura 30. Ajuste lineal para la muestra G de fracción de volumen 0.15 con pendiente $m=18.4061$.

La conductividad térmica corregida es:

$$k = 0.613 \pm 0.015 \text{ W/m}^\circ\text{K}$$

Corrección de la difusividad térmica.

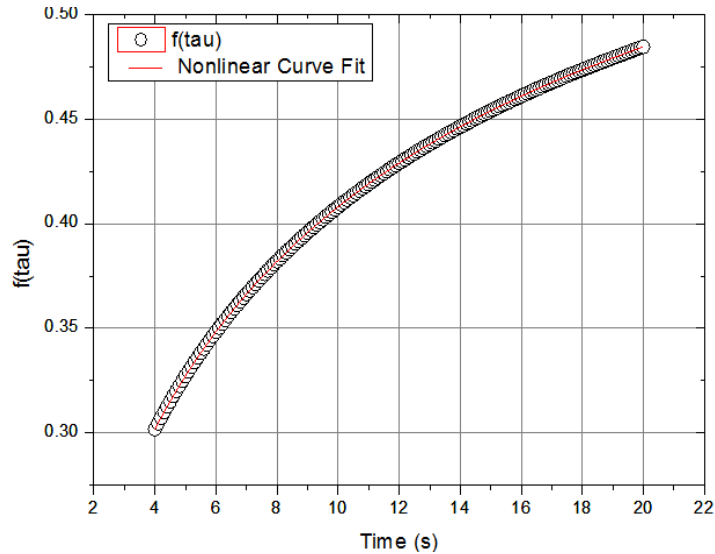


Figura 31. Ajuste no lineal de la muestra G para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.

La difusividad térmica es:

$$\alpha = 0.479 \pm 0.02 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Muestra H. Corrección de la conductividad térmica.

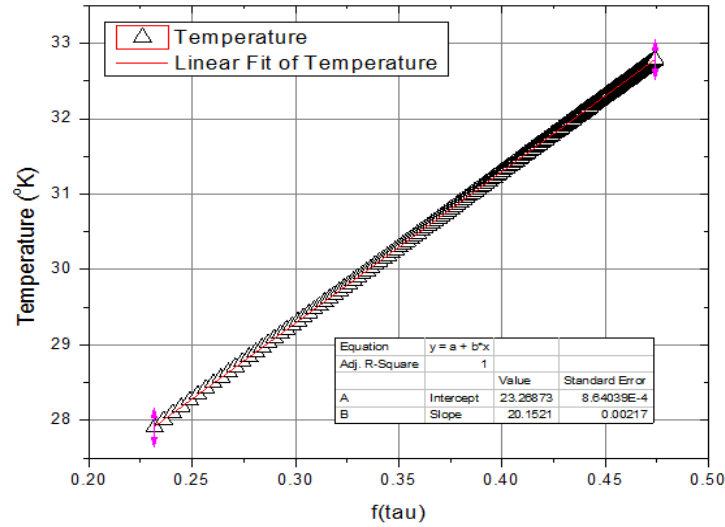


Figura 32. Ajuste lineal para la muestra H de fracción de volumen 0.2 con pendiente $m=20.152$.

La conductividad térmica corregida es:

$$k = 0.560 \pm 0.02 \text{ W/m}^0\text{K}$$

Corrección de la difusividad térmica.

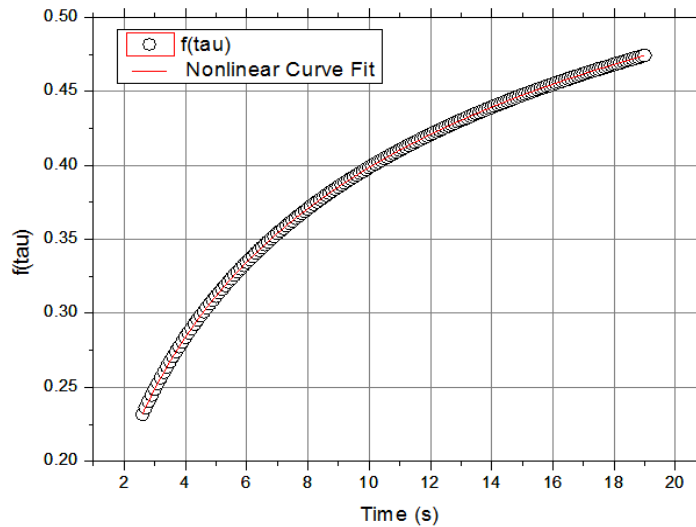


Figura 33. Ajuste no lineal de la muestra H para determinar la difusividad térmica con la ecuación 32.

La difusividad térmica es:

$$\alpha = 0.455 \pm 0.02 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

En resumen los resultados corregidos de difusividad (α) y conductividad térmica (k) se muestran en la tabla 10 junto con los valores calculados de la efusividad (e) y el calor específico volumétrico (ρc).

Muestra	v	k W/m ² k	α 10 ⁻⁶ m ² /s	e (calculada) Ws ^{1/2} m ⁻² K ⁻¹	ρc (calculada) MJ/Km ³
Concreto	0	0.800±0.020	0.550±0.020	1078.889	1.455
A	0.012	0.773±0.025	0.545±0.025	1046.954	1.418
B	0.024	0.716±0.030	0.524±0.030	989.329	1.367
C	0.056	0.715±0.025	0.502±0.025	1009.039	1.424
D	0.074	0.690±0.025	0.501±0.025	974.746	1.377
E	0.098	0.660±0.030	0.492±0.030	940.776	1.341
G	0.15	0.613±0.015	0.479±0.020	885.452	1.279
H	0.2	0.560±0.020	0.455±0.020	830.277	1.231

Tabla 10. Conductividad y difusividad térmica de composites de concreto con inclusión de esferas de poliestireno a distintas fracciones de volumen.

3.3 Análisis de resultados.

El modelo de Maxwell-Rayleigh con base a las ecuaciones 26 y 29 proporciona valores de conductividad térmica y difusividad térmica efectiva según las fracciones de volumen empleadas Utilizando las propiedades térmicas del poliestireno con conductividad 0.157W/m²K y difusividad térmica 0.125 x 10⁻⁶ m²/s (Thermophysical Properties of Matter) y las propiedades térmicas del concreto con 0.80W/m²K de conductividad y 0.55 x 10⁻⁶ m²/s de difusividad térmica obtenida por la técnica del Hot disk (Figura 34 y 35).

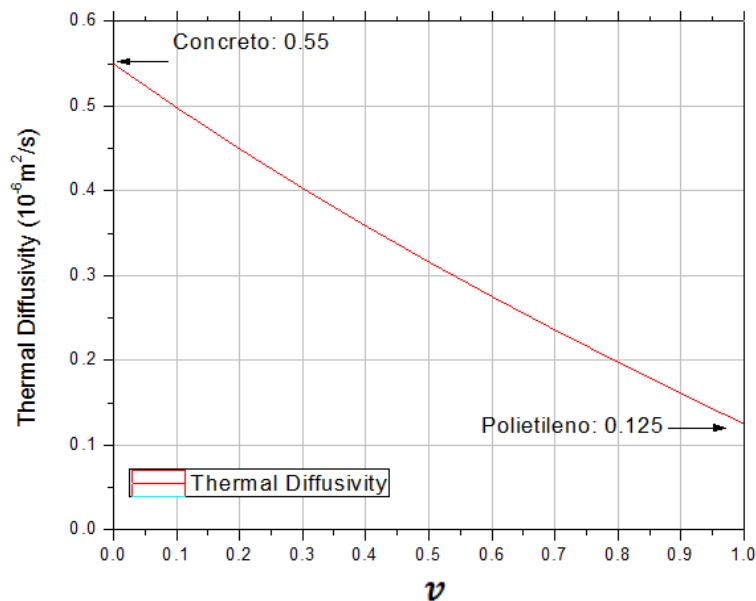


Figura 34. Gráfica de difusividad térmica efectiva de acuerdo al modelo de Maxwell-Rayleigh, variando las fracciones de volumen de 0 a 1.

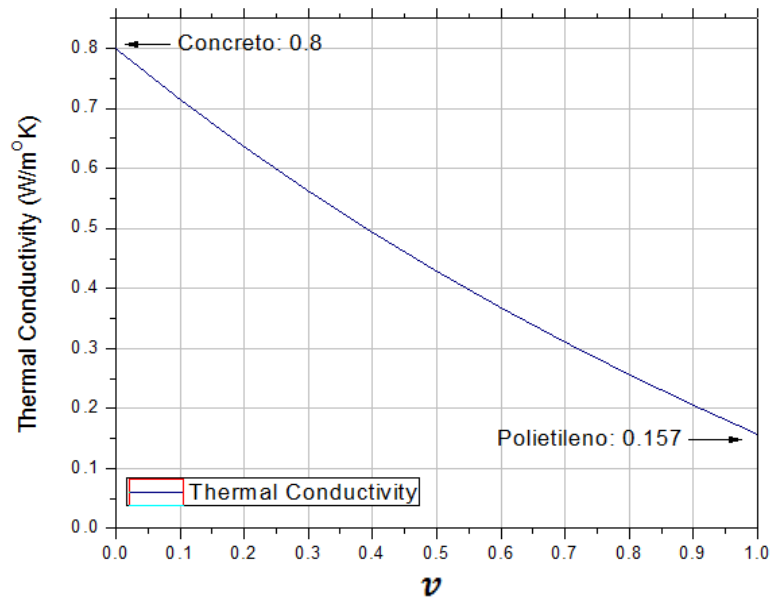


Figura 35. Gráfica de conductividad térmica efectiva de acuerdo al modelo de Maxwell-Rayleigh, variando las fracciones de volumen de 0 a 1.

Los resultados de conductividad y difusividad térmica obtenido por el modelo de Maxwell-Rayleigh llamados resultados teóricos Se comparan con los resultados experimentales de difusividad y conductividad térmica obtenidos por la técnica del Hot Disk (tabla 10) para obtener el rango de validez del modelo, así como también el umbral de error. (figura 36 y 37)

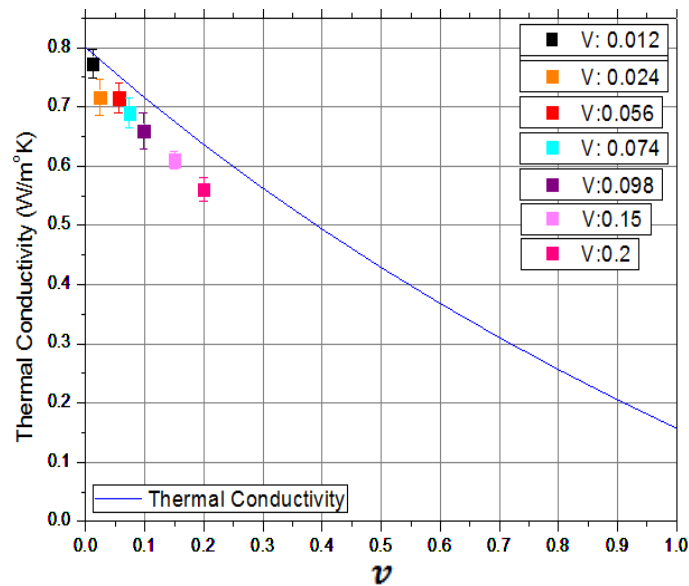


Figura 36. Comparación del modelo de Maxwell-Rayleigh de conductividad térmica efectiva con los resultados experimentales obtenidos por la técnica de Hot Disk.

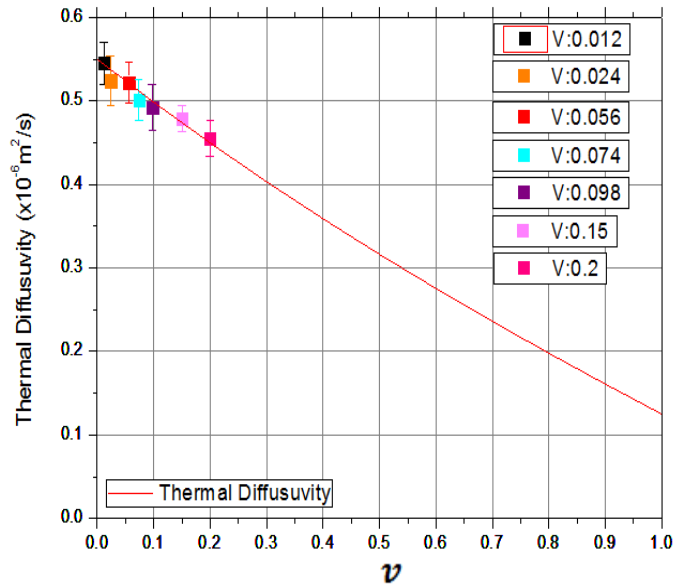


Figura 37. Comparación del modelo de Maxwell-Raileygh de difusividad térmica efectiva con los resultados experimentales obtenidos por la técnica de Hot Disk.

Comparando los resultados experimentales con el modelo, (Tabla 11 y 12) se tiene los siguientes resultados:

Conductividad Térmica

Muestra	ν	Valor Experimental	Valor Teórico	% Error
		k W/mK	k W/mK	
A	0.012	0.773±0.025	0.789	2%
B	0.024	0.716±0.030	0.779	8%
C	0.056	0.715±0.025	0.751	5%
D	0.074	0.690±0.025	0.736	6%
E	0.098	0.660±0.030	0.716	8%
G	0.15	0.612±0.015	0.675	9%
H	0.2	0.560±0.020	0.636	12%

Tabla 11. Comparación de valores experimentales con los valores teóricos del modelo.

Difusividad térmica

Muestra	ν	Valor Experimental	Valor teórico	% Error
		α $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$	α $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$	
A	0.012	0.545 ± 0.025	0.544	0.2%
B	0.024	0.524 ± 0.030	0.537	2%
C	0.056	0.502 ± 0.025	0.520	3%
D	0.074	0.501 ± 0.025	0.511	2%
E	0.098	0.492 ± 0.030	0.500	2%
G	0.15	0.480 ± 0.020	0.473	1%
H	0.2	0.460 ± 0.020	0.450	1%

Tabla 12. Comparación de valores experimentales de difusividad térmica con los valores teóricos del modelo.

Comparando los resultados experimentales de los composites de concreto a diferentes fracciones de volumen de esferas de poliestireno con los valores teóricos del modelo de Maxwell-Rayleigh, hay variaciones tanto para la difusividad térmica como la conductividad térmica, donde la diferencia es más notable. Los resultados indican lo siguiente:

Conductividad térmica: a medida que aumenta la fracción de volumen, la conductividad térmica reduce de tal manera que se aleja del modelo.

La máxima incorporación de esferas en los composites de concreto es del 20%, es decir con una fracción de volumen de 0.2, debido a que el concreto pierde adherencia y trabajabilidad a medida que la fracción de volumen es mayor a este valor, por lo que es necesario aplicar solución de elementos finitos para determinar la conductividad térmica a partir de esta fracción de volumen.

Como la incorporación de esferas de poliestireno debe ser experimentalmente menor a 0.2 de fracción de volumen, se determina el umbral de error para el cual el modelo deja de ser válido.

Para determinar el valor umbral de error se procede a realizar un ajuste con los resultados de conductividad (Figura 38 y Tabla 13), para así obtener la ecuación de ajuste y calcular los porcentajes de error de los valores experimentales con los valores teóricos.

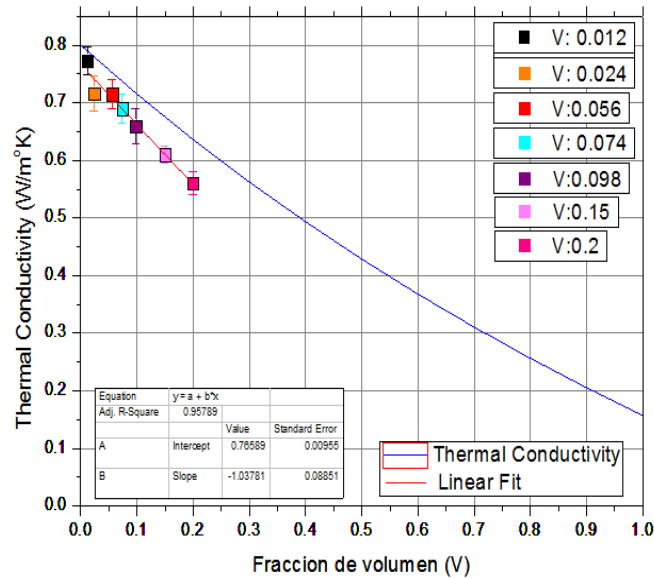


Figura 38. Ajuste lineal de los resultados experimentales, para determinar el umbral de error.

Ecuación	y = a + bx		
Adj. R-Square	0.95789		
		Value	Standard Error
a	Intercept	0.76589	0.00955
b	Slope	-1.03781	0.08851

Tabla 13. Ecuación del ajuste lineal de los resultados experimentales.

Una vez obtenida la ecuación de ajuste, que en este caso es una recta, se procede a calcular la fracción de volumen donde se encuentra el umbral de error del 5%, para ello se utiliza la ecuación de error porcentual (ecuación 33).

$$e\% = \frac{|V_T - V_E|}{V_T} * 100 \quad (33)$$

Donde V_T es el valor teórico y V_E el valor experimental.

Conociendo el porcentaje umbral de error de 5% y las ecuaciones para obtener los valores teóricos de conductividad térmica efectiva (ecuación 26) y la ecuación de ajuste de los valores experimentales (Tabla 13) se reemplaza en la ecuación (33) quedando de la siguiente manera:

$$(34) \quad 0.05 = \frac{K_4 \frac{2(1-v) + (1+2v)\lambda_{34}}{2+v+(1-v)\lambda_{34}} - (0.7658 - 1.0378v)}{K_4 \frac{2(1-v) + (1+2v)\lambda_{34}}{2+v+(1-v)\lambda_{34}}}$$

Donde $x=v$ = fracción de volumen de esferas de poliestireno y $K_4 = 0.8 \text{ W/m}^\circ\text{K}$, $\lambda_{34} = 0.19625$

De la ecuación 34 se despeja v dando como resultado la fracción de volumen donde se encuentra el umbral de error. En este caso es 0.07.

El modelo de Maxwell-Raileygh deja de ser válido, a partir de la fracción de volumen $v = 0.07$ para la conductividad térmica efectiva.

Difusividad Térmica: a diferencia de la conductividad térmica, a medida que aumenta la fracción de volumen de esferas, los valores experimentales de difusividad térmica se acercan al modelo. La principal causa de esto se debe a la distribución de esferas de poliestireno en el concreto, como se mencionó anteriormente se utiliza un sistema cúbico simple por el cual el flujo de calor atraviesa fácilmente (figura 39):

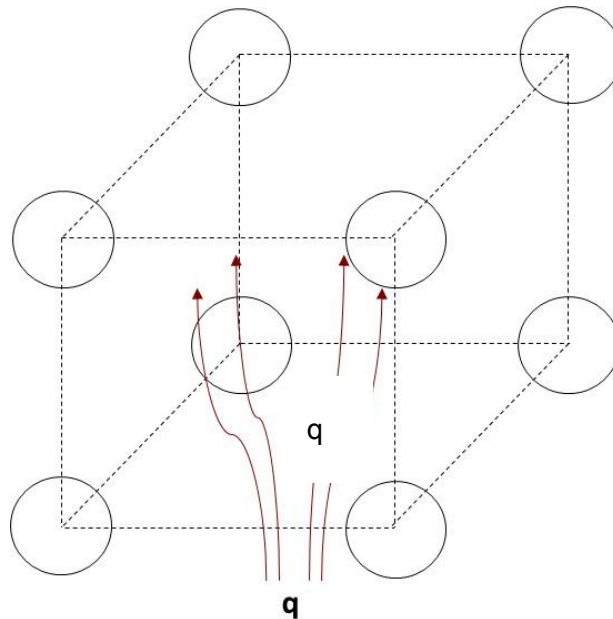


Figura 39. Flujo de calor a través del sistema de distribución cubico simple empleado en la elaboración de muestras.

Cambiando el sistema de distribución de esferas o colocando esferas en el centro del sistema cubico se supone que los resultados experimentales de difusividad térmica disminuyan y se alejen del modelo.



CAPITULO 4. ANALISIS DE LAS PROPIEDADES TERMICAS EN COMPOSITOS DE CONCRETO MEDIANTE SIMULACION NUMERICA POR COMSOL Multiphysics.

4.1 Introducción.

De acuerdo a él proceso llevado a cabo en la realización de las muestras se observó que para conservar las características de adherencia y trabajabilidad en el concreto, las muestras solo deben tener una fracción de volumen máxima de 20% o 0.2 de esferas de poliestireno. Por esta razón, para compositos de concreto con fracción de volumen mayores a dicho valor las propiedades térmicas solo se obtuvieron por análisis numérico por elemento finito, mediante la aplicación de software COMSOL Multiphysics. Para esto, primeramente se elaboró la gráfica 3-D de las muestras de concreto con inclusión de esferas de poliestireno, luego se asignó la física adecuada para la solución numérica y las condiciones de frontera congruentes al problema tomando en cuenta los datos experimentales como por ejemplo la temperatura inicial, la potencia de la fuente de calor y las características de los materiales. Al conjunto de datos que abarca desde la geometría, la física y la solución del problema se denomina Modelado.

4.2 Modelado.

Con base a la sección anterior, para establecer una secuencia lógica al desarrollo del experimento en el programa de simulación, se siguen los siguientes pasos:

- Pre-procesamiento.
- Procesamiento.
- Post-procesamiento.

4.2.1 Pre-procesamiento.

Se establecen los parámetros de simulación tomando en cuenta los experimentales, así como la potencia de la fuente y la geometría de la muestra (Tabla 14).

Nombre	Valor	Unidad	Descripción
Dm	5.5	cm	Diámetro de muestra
Am	2	cm	Altura de muestra
Po	0.2	W	Potencia del sensor
rp	1	mm	Radio de esferas de poliestireno

Tabla 14. Parámetros de simulación mediante COMSOL Multiphysics.

4.2.1.1 Geometría.

Para esquematizar el arreglo experimental de la técnica de Hot Disk, se realizaron diferentes geometrías en 3D de forma cilíndrica con 2cm de altura y 5.5 cm de diámetro con inclusión de esferas de poliestireno que varían en número dependiendo de la fracción de volumen requerida, siendo el diámetro de las esferas constante de 2 mm. (Figura 40).

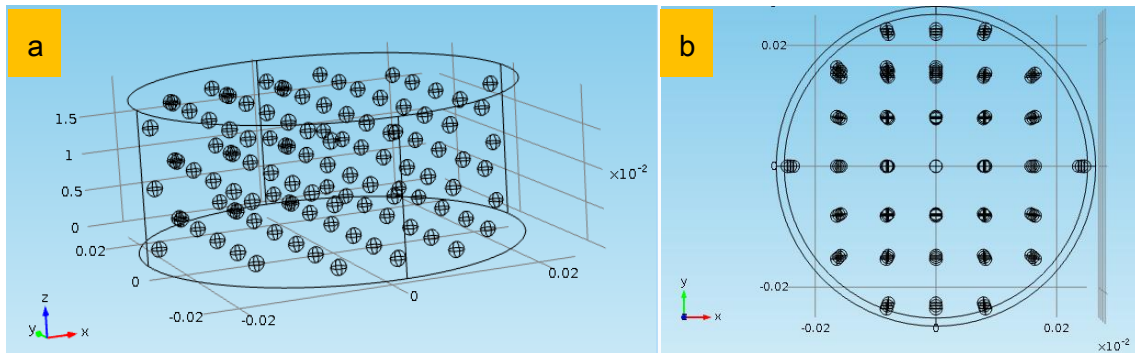


Figura 40. a) Vista lateral de la geometría. b) Vista en planta.

4.2.1.2 Materiales.

Los materiales empleados para la simulación son el Concreto y el poliestireno, con las propiedades que se describen en las tablas siguientes. Las del concreto se determinaron en este trabajo y las del poliestireno se obtuvieron de la referencia de 2007 de Wilson Nunes dos Santos.

Propiedad	Valor	Unidad
Conductividad Térmica (k)	0.80 ± 0.020	W/mK
Densidad (ρ)	1894	kg/m ³
Capacidad Calorífica (Cp)	776	J/kgK

Tabla 15. Propiedades del concreto.

Propiedad	Valor	Unidad
Conductividad Térmica (K)	0.157	W/mK
Densidad (rho)	1050	kg/m ³
Capacidad Calorífica (Cp)	1200	J/kgK

Tabla 16. Propiedades del poliestireno.

4.2.1.3 Física.

Para modelar el sistema o interacciones física la ecuación de difusión convección de calor (ecuación 35) se empleó a través del módulo de Transferencia de calor en sólidos.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (35)$$

Al no existir fuentes internas de calor y el término de movimiento de traslación u que solo está asociado a la transferencia de calor en fluido, la ecuación 35 queda de la siguiente manera:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = 0 \quad (36)$$

Donde $q = -k\nabla T$ es la ley de Fourier y C_p es el calor específico.

La cual es la ecuación de difusión de calor del tipo parabólico. Esta ecuación se aplica en todo el dominio. (Figura 41)

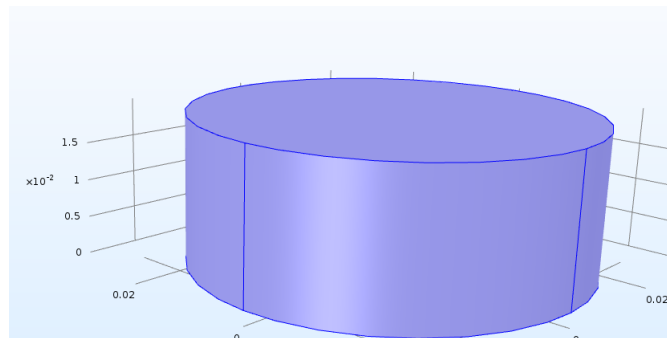


Figura 41. Transferencia de calor en sólidos aplicado a todo el dominio del elemento.

Condición de frontera de Dirichlet.

Esta condición establece una temperatura constante en la frontera exterior. Se puede visualizar como si el cuerpo estuviera en un baño térmico o si el cuerpo estuviera en equilibrio termodinámico localmente.

Esta condición se aplica a toda la frontera exterior.

$$T = T_{Exterior}$$

Donde T es la temperatura igual a $T_{Exterior} = 293.15K$

Condición de frontera de Neumann.

Esta condición fue aplicada en la cara posterior del elemento. La ecuación 37 muestra que el flujo de calor aplicado es normal al área de aplicación (figura 42)

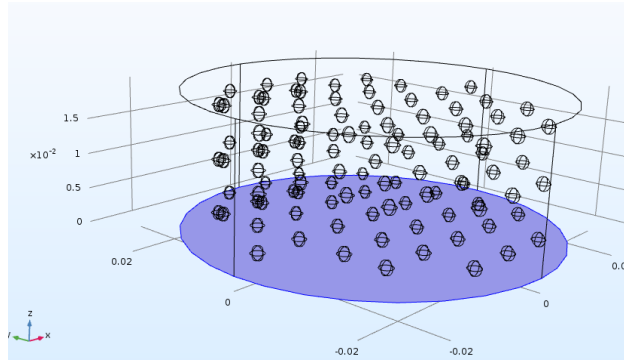


Figura 42. Condición de frontera de Neumann.

La ecuación de frontera es la siguiente:

$$-n \cdot q = q_o \quad (37)$$

Donde q_o es el flujo de calor aplicado a toda el área,

$$q_o = \frac{P_o}{A},$$

P_o es la potencia en Watts y A es el área en m^2 .

4.2.1.4 Mallado.

En este modelo se utilizó una malla tetraédrica distribuida en el dominio (Figura 43). Para obtener una solución más exacta el mallado tiene una calibración fina ya que genera una mayor cantidad de elemento y cálculos para obtener así una mejor convergencia de la solución. Los parámetros utilizados en la malla se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Descripción	Magnitud	Unidad
Maximum elemet size	0.004	m
Minimum elemet size	5E-4	m
Maximum elemet grow thrate	1.45	
Resolution of curvature	0.5	
Resolution of narrow regions	0.6	

Tabla 17. Parámetros del tamaño del elemento.

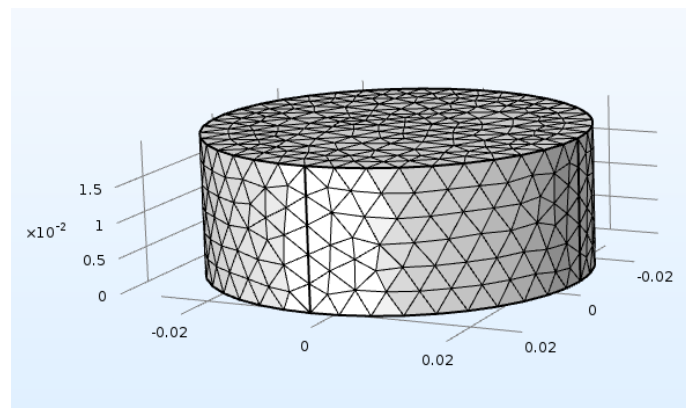


Figura 43. Mallado para todo el dominio de simulación.

4.2.2 Procesamiento.

5.2.2.1 Estudio.

Es dependiente del tiempo en un rango de análisis desde 0 a 25 sg con intervalos de 0.1 segundos, por lo que el vector de tiempo es (0,0.1, 20), con tolerancia de 0.001, método global BDF con un máximo cuadrático y el tipo de solver es GMRES que es un método iterativo para solución de sistemas de ecuaciones lineales. El número de iteraciones para esta simulación es 50.

4.2.3 Postprocesamiento.

Se realizó la simulación para las muestras de concreto con inclusión de esferas de poliestireno a diferentes fracciones de volumen, siendo estas 0.012, 0.024, 0.056, 0.074,



0.098, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5 dando los siguientes resultados de conductividad y difusividad térmica. (Tabla 17)

v	k , W/mK	α , $10^{-6}m^2/s$
0.012	0.786	0.535
0.024	0.777	0.528
0.056	0.742	0.504
0.074	0.729	0.496
0.098	0.705	0.480
0.150	0.662	0.450
0.200	0.615	0.418
0.300	0.548	0.373
0.400	0.482	0.328
0.500	0.417	0.285

Tabla 18. Resultados de la simulación para diferentes fracciones de volumen.

4.3. Comparación de la simulación con el modelo de Maxwell-Raileygh y el experimento con la técnica de Hot Disk.

4.3.1 Comparación con el Modelo de Maxwell-Raileygh.

Comparando los resultados de la simulación con los datos del modelo tomando en cuenta las ecuaciones del modelo de Maxwell-Raileygh que son la ecuación 26 para la conductividad térmica efectiva y ecuación 29 para la difusividad térmica con los valores de conductividad del concreto k_c : 0.80 W/mK y del poliestireno k_p : 0.157 W/mK y la difusividad térmica $\alpha_c= 0.55 m^2/s$ del concreto y del poliestireno α_p : 0.125 m^2/s , se obtienen las siguientes graficas (figura 44 y 45):

Conductividad Térmica.

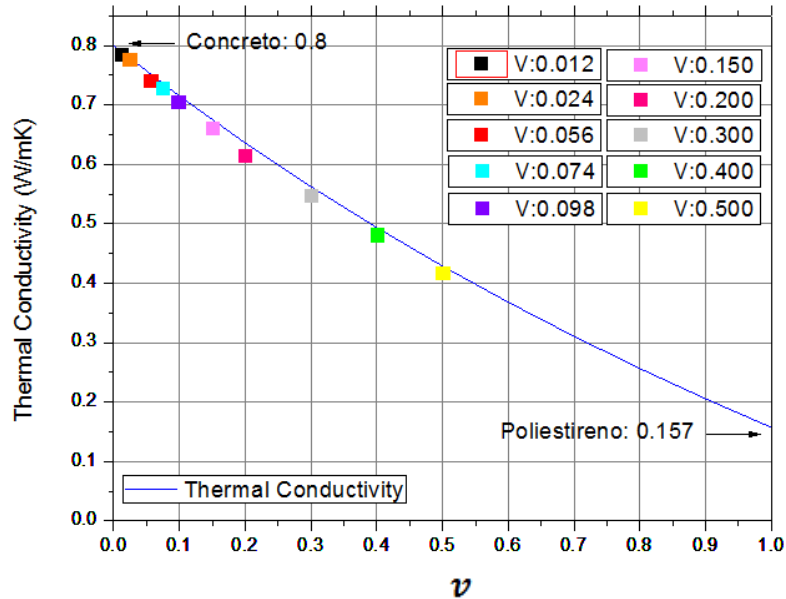


Figura 44. Comparación de los resultados de simulación de conductividad térmica con el modelo.

El error porcentual existente entre los resultados del modelo y los resultados de la simulación son las siguientes:

ν	Resultados de la simulación		Resultados del modelo	
	k, W/Mk	k, W/mK	k, W/mK	%e
0.012	0.786	0.789	0.789	0.4%
0.024	0.777	0.779	0.779	0.3%
0.056	0.742	0.751	0.751	1%
0.074	0.729	0.736	0.736	1%
0.098	0.705	0.716	0.716	2%
0.15	0.662	0.675	0.675	2%
0.2	0.615	0.636	0.636	3%
0.3	0.548	0.562	0.562	3%
0.4	0.482	0.494	0.494	3%
0.5	0.417	0.428	0.428	3%

Tabla 19. Comparación de resultados de Conductividad térmica de la simulación con el modelo.

Difusividad térmica.

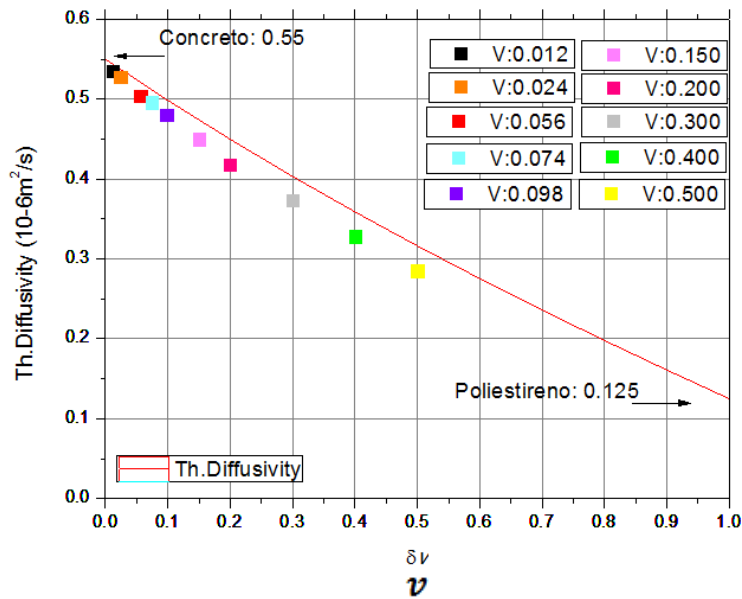


Figura 45. Comparación de los resultados de simulación de difusividad térmica con el modelo.

El error porcentual entre los resultados del modelo y la simulación son las siguientes:

ν	Resultados de la Simulación	Resultados del Modelo	%e
	$\alpha, 10^{-6}m^2/s$	$\alpha, 10^{-6}m^2/s$	
0.012	0.535	0.544	2%
0.024	0.528	0.537	2%
0.056	0.504	0.520	3%
0.074	0.496	0.511	3%
0.098	0.480	0.500	4%
0.15	0.450	0.473	5%
0.2	0.418	0.450	7%
0.3	0.373	0.403	7%
0.4	0.328	0.359	9%
0.5	0.285	0.316	10%

Tabla 20. Comparación de resultados de la difusividad térmica de la simulación con el modelo.

4.3.2 Comparación de los resultados de la simulación con los resultados experimentales.

Los parámetros iniciales de simulación, como la potencia, geometría y temperatura fueron los mismos utilizados en el experimento mediante la técnica de Hot Disk. Comparando ambos resultados se obtiene lo siguiente:

Conductividad Térmica

	Experimental	Simulación	
ν	k, W/mK	k, W/mk	% e
0.012	0.773 ± 0.025	0.786	2%
0.024	0.716 ± 0.030	0.777	8%
0.056	0.715 ± 0.025	0.742	4%
0.074	0.690 ± 0.025	0.729	5%
0.098	0.660 ± 0.030	0.705	6%
0.15	0.613 ± 0.015	0.662	7%
0.2	0.560 ± 0.020	0.615	9%

Tabla 21. Comparación de resultados de la conductividad térmica de la simulación con el experimento.

Difusividad Térmica.

	Experimental	Simulación	
ν	α , $10^{-6}m^2/s$	α , $10^{-6}m^2/s$	% e
0.012	0.545 ± 0.025	0.535	2%
0.024	0.524 ± 0.030	0.528	1%
0.056	0.502 ± 0.025	0.504	0.4%
0.074	0.501 ± 0.025	0.496	1%
0.098	0.492 ± 0.030	0.480	3%
0.15	0.479 ± 0.020	0.450	6%
0.2	0.455 ± 0.020	0.418	9%

Tabla 22. Comparación de resultados de la difusividad térmica de la simulación con el experimento.

4.4 Sistema de distribución de esferas de red periódica cúbica centrada en el cuerpo.

El sistema utilizado para la distribución de esferas de poliestireno en el concreto es el cubico simple, sin embargo los valores de difusividad y conductividad térmica efectiva pueden variar cambiando este sistema de distribución. Para comprobar la variación de las propiedades térmicas en compositos de concreto con inclusión de esferas de poliestireno se cambia el sistema de distribución cubico simple a una distribución centrado en el cuerpo (figura 46 a).

Se hace la simulación para las fracciones de volumen de 0.012, 0.024, 0.056, 0.074 y 0.098, esto debido a que las esferas de poliestireno centradas en el cuerpo en fracciones de volumen mayor a 0.098 se traslapan.

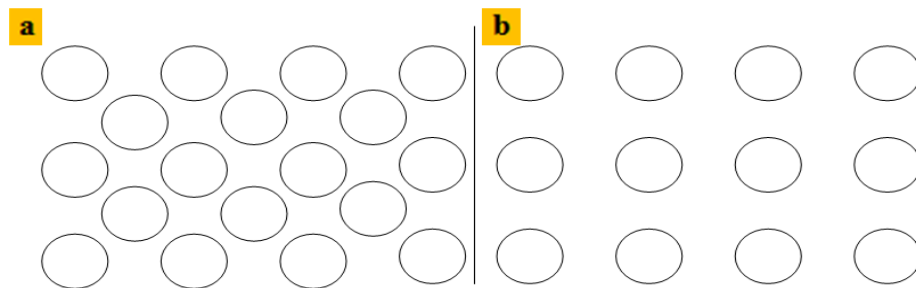


Figura 46. a) Sistema de distribución de red periódica cubica centrada en el cuerpo. b) Sistema de distribución cúbico simple.

Utilizando los mismos materiales, parámetros y geometría de la simulación anterior, los resultados de difusividad y conductividad térmica son los siguientes:

v	k , W/mK	α , $10^{-6}m^2/s$
0.012	0.701	0.477
0.024	0.614	0.418
0.056	0.551	0.375
0.074	0.491	0.341
0.098	0.423	0.288

Tabla 23. Resultados de conductividad y difusividad térmica con distribución centrado en el cuerpo.

Comparando estos resultados con el modelo de Maxwell-Rayleigh se obtiene lo siguiente:

Conductividad Térmica.

	Simulación	Modelo	
ν	k, W/mK	k, W/mK	%Error
0.012	0.701	0.789	11.153%
0.024	0.614	0.779	21.181%
0.056	0.551	0.751	26.631%
0.074	0.491	0.736	33.300%
0.098	0.423	0.716	40.921%

Tabla 24. Comparación de los resultados de conductividad térmica de la simulación del sistema de distribución centrado en el cuerpo con el modelo de Maxwell-Rayleigh.

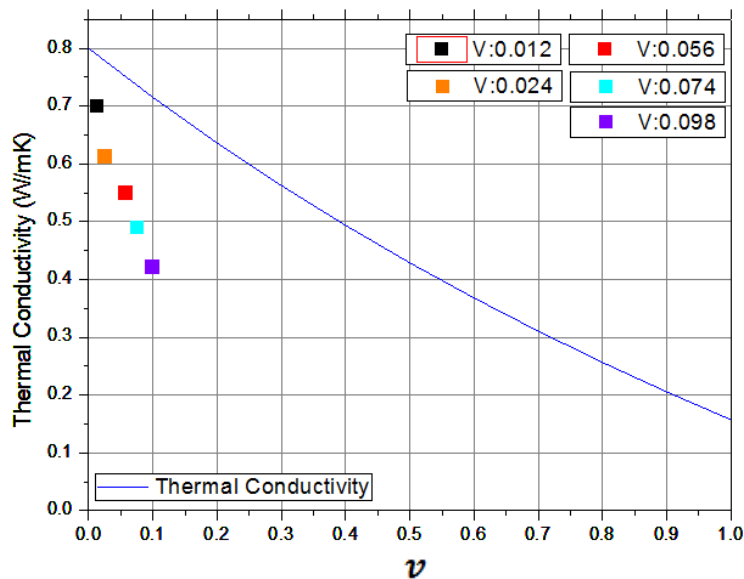


Figura 47. Comparación de los resultados de conductividad térmica con el modelo.

Difusividad Térmica

	Simulación	Modelo	
v	α , $10^{-6}m^2/s$	α , $10^{-6}m^2/s$	%Error
0.012	0.477	0.544	12.316%
0.024	0.418	0.537	22.160%
0.056	0.375	0.520	27.884%
0.074	0.341	0.511	33.268%
0.098	0.288	0.500	42.400%

Tabla 25.Comparación de los resultados de difusividad térmica de la simulación del sistema de distribución centrado en el cuerpo con el modelo de Maxwell-Rayleigh.

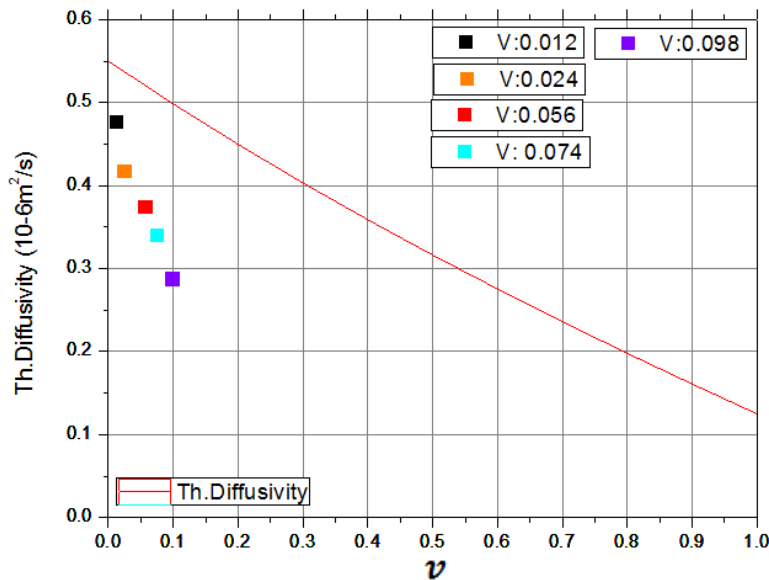


Figura 48.Comparacion de los resultados de conductividad térmica con el modelo.

Con el sistema de distribución centrado en el cuerpo los valores de la conductividad y difusividad térmica reducen significativamente a medida que la fracción de volumen aumenta.



CAPITULO 5. CONCLUSIONES

Se determinaron las propiedades de transporte térmico en composites de concreto en función de la fracción de volumen de los agregados de esferas de poliestireno. Mediante la aplicación del sistema analizador de propiedades térmicas *Hot Disk* se obtuvieron los valores experimentales de la conductividad y difusividad térmica y por análisis numérico utilizando COMSOL Multiphysics se calcularon los valores de dichas propiedades haciendo una comparación de resultados. Asimismo, se aplicó el modelo de Maxwell-Rayleigh al sistema de muestras estudiadas y se determinó su rango de validez con la fracción de volumen de acuerdo a los resultados experimentales y numéricos.

Mediante el agregado de esferas de poliestireno se elaboraron muestras de composites de concreto en una red periódica cúbica simple con fracciones de volumen desde un valor de 0.012 a 0.2, de acuerdo a la norma NMX-C-061-ONNCCE / ASTM C-31/ASTM C-192 (Preparación y curado de especímenes de ensayo).

Aplicando el sistema analizador de propiedades térmicas *Hot Disk* se obtuvieron los valores experimentales de la conductividad (k) y difusividad térmica (α) en las muestras de composites de concreto en función de la fracción de volumen (ν) de los agregados de esferas de poliestireno. Los resultados muestran un cambio de k y α con ν en forma monótona decreciente con un cambio en k hasta del 30% y de α hasta de 16.4% para $\nu = 0.2$.

Se obtuvo el comportamiento teórico de k y α con ν utilizando el modelo de Maxwell-Rayleigh con resultados similares a los obtenidos en forma experimental pero con errores porcentuales ($e\%$) en su comparación que van del 2 al 12% para k y del 0.2 al 3% para α . Se observan altos valores de $e\%$ en k para valores de ν por encima de 0.1 y bajos valores de $e\%$ para α en todo el rango de 0.012 - 0.2. La diferencia se debe a que con el incremento de ν va perdiendo validez la suposición de la independencia de las esferas al flujo de calor del modelo teórico.

Debido a las significativas desviaciones del modelo de Maxwell-Rayleigh a los resultados experimentales para altos valores de ν se realizó la simulación numérica mediante COMSOL *Multiphysics* para demostrar su utilidad predictiva, sobre todo en el rango de ν donde el modelo de Maxwell-Rayleigh deja de ser confiable. La comparación de resultados numéricos con los experimentales muestran una mayor congruencia con un $e\%$ que va del 2 al 9% para k y del 0.2 al 9% para α .

Para proponer un valor umbral ν_0 del rango de validez para ν se realizó la comparación de los resultados teóricos con los numéricos, realizando el análisis para valores de ν hasta de 0.5. Los resultados muestran un $e\%$ no mayor al 3% en k para valores de ν en todo el rango



de 0.12 a 0.5 y un $e_{\%}$ no mayor al 3% en α para valores de ν menores a 0.074, tomando este valor como ν_0 .

Finalmente, se llevaron a cabo análisis numéricos y teóricos con el modelo de Maxwell-Rayleigh para composites de concreto con agregados de esferas de poliestireno dispuestas en una red periódica cubica centrada en el cuerpo. La comparación de resultados muestra notables diferencias de hasta el 40% en k y hasta del 42% en α para valores de ν cercanos a 0.1. La inclusión de una esfera en el centro de cada cubo de la red conduce a una perturbación e interferencia en el flujo de calor entre las esferas provocando una pérdida de validez del modelo teórico.



BIBLIOGRAFIA.

- A. Lanciani, P. Morabito, P. Rossi. 1989. *Measurement of the thermophysical properties of structural materials in laboratory and in site: methods and instrumentation, High Temp.* High Press. 21
- A. Laukaitis, R. Zurauskas, J. Kerien E, (2005) *The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties, Cement & Concrete Composites* 27.
- A.M. Neville, (1995). *Properties of Concrete*. UK: Longman, UK, 1995.
- Abanto Castillo, F (). *Tecnología del concreto*, , Lima, Perú: Editorial San Marcos.
- ACI Committe 207 (1994). *Mass concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1*, Detroit: American Concrete Institute.
- ACI, (2005). Normas ACI.
- Alduaij J, Alshalch K, Haque MN, Ellaythy K. (1999) *Lightweight concrete in hot coastal areas*. *CemConcr Comp*;21(5-6):453-8.
- Almond, D.P. & Patel, P.M. (1996). *Photothermal Science and Techniques*, First edition Chapman & Hall.
- ARQHYS. "Materiales refractarios". 2012,12
- Askeland, Ciencia e ingeniería de los materiales. Enero 1998.
- Adriana Valdes. "De cara al siglo XXI La arquitectura y el concreto". 2015.
- Bajdur W, Pajaczkowska J, Makarucka B, Sulkowska A, Sulkowski WW. (2002) *Effective polyelectrolytes synthesized from expanded polystyrene wastes*. *Eur Polym J*;38(2).
- Bein, B. K. & Pelzl, J. (1989), *Plasma Diagnostics* 6, 211.
- Bignozzi MC, Sacconi A, Sandrolini F. (2002) *New polymer mortars containing polymeric wastes. Part 2. Dynamic mechanical and dielectric behaviour*. *Compos Part A: Appl Sci Manufactur*;33(2):205-11.
- Bohac, V., Gustafsson, M., Kubicar, L. & Gustafsson, S. (2000) *Rev. Sci. Instrum.*, 71(6), 2452
- Buyukozturk O. (1998) "Imaging of concrete structures" en *NDT & E International*, Vol 31. London: Elsevier Science Ltd.
- Catálogo de elementos constructivos del CTE (Código técnico de la edificación) Redacción: Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción con la colaboración de CEPCO y AICIA. Marzo 10



- Comsol (2017). “COMSOL Multiphysics The Platform for Physics-Based Modeling and Simulation”
- Constructor Civil (2011), “Resistencia del Concreto”.
- D. Whiting, A. Litvin and S.E. Goodwing, “Specific heat of selected concretes”, J. Amer. Concr. Inst., 75, 1978, pp. 299-305.
- Dahlquist, G. (2005) *SIAM Obituary*
- Demirboga, R. & Kan, A. (2012), “Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes” en *Construction and Building Materials*, 35.
- Ducman, V. Mladenovic A. & Suput JS, (2002). *Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity* 32. Ljubljana, Slovenia: CemConcr Res;
- Frank, P. Incropera, D. & DeWitt, P. (1996). *Fundamentos de transferencia de calor*. 4ª Edición.
- Guarachi, F. (2016), *Propiedades térmicas en compositos de concreto*.
- Gustafsson, (1994) Recuperado el 2 de marzo del 2017 de <https://www.thermtest.com/featured-author-silas-gustafsson>
- Hak-Chul S. & Kodide U. (2012), “Thermal conductivity of ternary mixtures for concrete pavements”, en *Cement & Concrete Composites* 34.
- J. Heyman. “*La ciencia de las estructuras*”. Instituto Juan de Herrera (Madrid). 2001.
- Holman, J.P. (1998). *Transferencia de Calor*, [8ª ed., 1ª ed. en español]. España: McGraw Hill.
- Hummel, R.E., Morrone, A., Ludwig, M., & Chang, (1993), “Caracterización Térmica del Silicio Poroso Elaborado mediante Erosión por Chispa S.-S” en *Appl. Phys. Lett.* 63,
- IMCYC (2004) *Conceptos Básicos del Concreto*. Cap. 2 Julio 2004.
- IMCYC, (2016) *Manual del técnico para pruebas al concreto en obra. Grado I*. Capítulo 7. 103
- Inagaki T., Ishii T., Iwamoto T., (1999). “On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography” en *NDT & E International*, Vol 32. London: Elsevier Science Ltd.
- Incropera, F. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. (4a. ed.). México: Prentice Hall



- James Strike, Salvador; Perez Arroyo, MariaJesus. “*De la construcción a los proyectos*”.Ed. Reverté. 2004.
- Insunza, J. () “*Mecanismos de transferencia de calor*”.
- J.M. Scanlon and J.E. McDonald, “ Thermal properties in Concrete and Concrete-Marking”, Eds P. Klieger and J.F. Lamond, ASTM Sp. Tech. Publ. num. 169C, Philadelphia, Pa, 1994, pp. 299-39.
- Kearsley, EP. &Wainwright, PJ. (2001), *The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete*. Cem Concr Res 31;105–12.
- Kodur, V. &Khaliq, W. (2010), *Journal of materials in civil engineering*.
- Kodur, V. &Khaliq, W. (2011).*Cement and Concrete Research*.
- Kook-Han Kim, Sang-Eun Jeon, Jin-Keun Kimb, Sungchul Yang,(2003)*An experimental study on thermal conductivity of concrete*, *Cement and Concrete Research* 33. Korea del Sur.
- Kook-Han, K., Sang-Eun, J., Jin-KeunK. &Sungchul Y. (2003) *An experimental study on thermal conductivity of concrete*, *Cement and Concrete Research* 33. Korea del Sur.
- Kumar Metha y Paulo Monteiro. “*Concreto, Estructura, propiedades y materiales*”. 1998. IMCYC. México.
- Larsson O., Thelandersson S., 2011. “*Estimating extreme values of thermal gradients in Structures*”,en *Materials and Structures*,No, 44. Reino Unido.
- M. Hernández, C. Albano, N. Camacho, A. J. Bravo, H. Guevara, (2008), *Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas*.Rev. Fac. Ing. UCV v.23 n.1 Caracas.
- M. Mamillan, *Traitement thermique desbetons*, in *Le betonhydraulique*, Press de I’ EcoleNationale des Ponts de Chaussees, Pris, 1982, pp. 261-9.
- Manual de Hotdisk, Thermal Constants Analyser.
- Martínez G, Martínez E, Martínez M, (2012), *Concreto polimérico reforzado con fibras: Efecto de la radiación Gamma*.
- MassudS., K.Roger, V.Vasoulla, (2004), *Fibras de vidrio, Acero y Polipropileno: Hormigón con Fibras más Resistente*, BIT Revista Técnica de la Construcción,



Enero, Chile,

(Massud S., K. Roger, V. Vasoulla, 2004, p. 50-52.)

MdAzree O., Y.C. Wang, (2011). *Elevated-temperature thermal properties of lightweight foamed concrete*, *Construction and Building Materials* 25.

MdAzree Othuman Mydin, Y.C. Wang, (2012) "Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures", en *Construction and Building Materials* 26.

Montes, R. (2015), *Aplicación del programa Comsol Multiphysics en la ingeniería Mecánica*.

Morabito, P. (1989). *Measurement of the thermal properties of different concretes*, *High Temp*. High Press.

Nguyen, L.H., Beaucour, L.H. & Ortola, S. (2014), *Construction and building*.

Palos, A., D'Souza, N.A., Snively, C.T. & Reidy, R.F. (2001), *Modification of cement mortar with recycled ABC*. *Cem Concr Res*; 31; 1003-7.

Peralta Jose Luis. *Materiales Compuestos*. 1ra Edición.

Pontificia Universidad Católica de Chile, (2006). *Dosificación de Hormigones*, Departamento Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Ramiz D., Albinas G., Dangyras Z., (2002) "Determination of Thermal-Mechanical Properties of Concrete", en *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol VIII, No 2.

Ramos, F. & Carril, R. (1998-1999). *Cuaderno didáctico de fundamentos físicos de la ingeniería, Prácticas de laboratorio*.

Rodríguez G. Douglas R., Pereira S. Natalie A. (10 de mayo de 2007). *Evolución y tendencias actuales en resinas compuestas*. *Acta Odontológica Venezolana* volumen 46 N° 3 / 2008. Consultado el 3 de marzo de 2016.

Savastano, H. & Warden, P.G. (2000), *Costs RSP Brazilian waste fibres as rein for cement for cement-based composites*. *Cem Concr Compos* 22(5); 379-84.

Sayil BM, Gurdal E. (1999), *The physical properties of polystyrene aggregated gypsum blocks. Durability of building materials and components*, vol. 8, Institute for Research in Construction, Ottawa, Canada.

Sri Ravindrarajah R. (1999) *Bearing strength of concrete containing polystyrene*



- aggregate. Durability of Building Materials and Components*, 8, Institute for Research in Construction, Ottawa, Canada.
- Thermophysical Properties of Matter, The TPRC Data Series, Vol. 10. Thermal Diffusivity. Y. S. Touloukian, R. W. Powell, C. Y. Ho, M. C. Nicolaou.1973.
- Tavares C, Ribeiro M, Ferreira A, Guedes R, (2002) *Compos. &Structures*.
- U.S. Army (1988). *Corps of Engineers Technical Manual: Arctic and Subarctic Construction: Calculation Methods for Determination of Depths of Freeze and Thaw in Soils*, TM 5-852-6/AFR 88-19, Volume 6, 1988, Equation 2-1.
- Varughese, KT. & Chaturvedi, BK. (1996). *Fly ash fine aggregate in polyester based polymer concrete*. *Cem Concr Compos*;18(2).
- Wilson Nunes dos Santos 2007. “*Thermal properties of polymers by non-steady-state techniques.*”
- Yue YL, Li GZ, Xu XS, Zhao ZJ. (2000) *Properties and microstructures of plan-fiber-rein for cedcement-based composites*. *Cem Concr Res*; 30; 1983–6.
- Yves Jannot and Zoubir Acem 2007 A quadrupolar complete model of the hot disc.