### POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Edile - Architettura

Corso di Laurea in Ingegneria dei Sistemi Edilizi



Modelo integrado para la evaluación de la compactación en las propiedades térmicas de hormigones porosos.

Modello integrato per la valutazione delle proprietà termiche del calcestruzzo poroso in funzione del grado di compattazione.

Relatore: Prof. Liberato FERRARA

Co-relatore: Prof. Sergio Henrique PIALARISSI CAVALARO

Tutor: Ing. Ricardo PIERALISI

Tesi di Laurea di:

Marco BINFARE' Matr.: 786883

Anno Accademico 2013 - 2014

### "Dóna-lí a la vída una altra oportunítat que la felícitat casí sempre fa tard, però arríba"

[Manu Guíx amb Pau Donés]

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE LAS FIGURAS.       IX         ÍNDICE DE LAS TABLAS       XIX         ÍNDICE DE LOS CODIGOS       XXVII         ABSTRACT (ENGLISH)       XXIX         ABSTRACT (ESPAÑOL)       XXXII         ABSTRACT (ITALIANO)       XXXII         BSTRATTO ELABORATO IN ITALIANO       XXXV         CAPÍTULO 1       1         INTRODUCCIÓN       1         1.1       ANTECEDENTES         1.2       OBJETIVO         2       1.2.1         Objetivo general       2         1.2.2       Objetivo general         2.1       Objetivo específicos         2.1       Objetivo específicos         2.1       INTRODUCCIÓN         1.3       METODOLOGÍA         S       2.1         INTRODUCCIÓN       5         2.2       HORMIGÓN POROSO       5         2.2.1       Aspectos generales del hormigón poroso       18         2.3       AnáLISIS TÉRMICO DE HORMIGONES       23         2.3.1       Hormigón poroso       23         2.3.1       Hormigón poroso       23         2.3.1       Hormigón poroso       23         2.4       Discusión       33 </th <th></th> <th></th>		
ÍNDICE DE LAS TABLAS       XIX         ÍNDICE DE LOS CODIGOS       XXXVII         ABSTRACT (ENGLISH)       XXIX         ABSTRACT (ESPAÑOL)       XXXVII         ABSTRACT (ITALIANO)       XXXVII         ESTRATTO ELABORATO IN ITALIANO       XXXV         CAPÍTULO 1       1         INTRODUCCIÓN       1         1.1       ANTECEDENTES         1.2       Objetivo general         1.2.1       Objetivo general         1.2.2       Objetivo general         1.2.3       METODOLOGÍA         2       3         CAPÍTULO 2       5         ESTADO DEL ARTE       5         2.1       INTRODUCCIÓN         3       CAPÍTULO 2         2.3       Anantes del hormigón poroso         2.3       Empleos del hormigón poroso         2.3       Analus del hormigón poroso         2.3.1       Hormigón poroso         2.3       Analus del hormigón poroso         2.3       Analus termigón poroso         2.3       Analus termigón poroso         2.3       Analus termigón poroso         2.3       Analus termigón poroso         2.3       Analus teremigón poroso         <	ÍNDICE DE LAS FIGURAS	IX
ÍNDICE DE LOS CODIGOS       XXVII         ABSTRACT (ENGLISH)       XXIX         ABSTRACT (ESPAÑOL)       XXXI         ABSTRACT (ITALIANO)       XXXII         ESTRATTO ELABORATO IN ITALIANO       XXXV         CAPÍTULO 1       1         INTRODUCCIÓN       1         1.1       ANTECEDENTES       1         1.2       OBJETIVO       2         1.2.1       Objetivo general       2         1.2.2       Objetivo general       2         1.3       METODOLOGÍA       3         CAPÍTULO 2       5       5         ESTADO DEL ARTE       5       2         2.1       INTRODUCCIÓN       5         2.2.1       Aspectos generales del hormigón poroso.       5         2.2.1       Aspectos generales del hormigón poroso.       13         2.3       AnÁLISIS TÉRNICO DE HORMIGONES       23         2.3.1       Hormigón poroso.       23         2.3.1       Hormigón poroso.       23         2.4       DISCUSIÓN       33	ÍNDICE DE LAS TABLAS	xıx
ABSTRACT (ENGLISH)       XXIX         ABSTRACT (ESPAÑOL)       XXXII         ABSTRACT (ITALIANO)       XXXIII         ESTRATTO ELABORATO IN ITALIANO       XXXV         CAPÍTULO 1       1         INTRODUCCIÓN       1         1.1       ANTECEDENTES         1.2       OBJETIVO         1.2.1       Objetivo general         1.2.2       Objetivo general         1.3       METODOLOGÍA         SESTADO DEL ARTE       5         2.1       INTRODUCCIÓN         2.2       HORMIGÓN POROSO         2.3       ANÁLISIS TÉRMICO DE HORMIGONES         2.3.1       HORMIGÓN POROSO         2.3.1       HORMIGÓN POROSO         2.3.1       HORMIGON POROSO         2.3.1       HORMIGONES         2.3.1       HORMIGONES         2.3.1       HORMIGONES         2.3       CAPINIGÓN POROSO         2.4       DISCUSIÓN	ÍNDICE DE LOS CODIGOS	xxvii
ABSTRACT (ESPAÑOL)       XXXII         ABSTRACT (ITALIANO).       XXXIII         ESTRATTO ELABORATO IN ITALIANO.       XXXV         CAPÍTULO 1       1         INTRODUCCIÓN.       1         1.1       ANTECEDENTES         1.2       OBJETIVO         2       1.2.1         1.2.2       Objetivo general         1.2.2       Objetivo general         1.3       METODOLOGÍA         S       21.3         ESTADO DEL ARTE       5         2.1       INTRODUCCIÓN       5         2.2.1       Aspectos generales del hormigón poroso.       5         2.2.1       Aspectos generales del hormigón poroso.       13         2.3       ANÁLISIS TÉRMICO DE HORMIGONES       23         2.3.1       Hormigón poroso.       23         2.3.1       Hormigón poroso.       23         2.4       DISCUSIÓN       33	ABSTRACT (ENGLISH)	ххіх
ABSTRACT (ITALIANO).XXXIIIESTRATTO ELABORATO IN ITALIANO.XXXVCAPÍTULO 11INTRODUCCIÓN.11.1ANTECEDENTES1.2OBJETIVO21.2.1Objetivo general21.2.2Objetivo específicos21.3METODOLOGÍA3CAPÍTULO 25ESTADO DEL ARTE52.1INTRODUCCIÓN2.2HORMIGÓN POROSO2.3Anxálisis Térmico De Hormigón poroso2.3ANÁLISIS TÉRMICO DE HORMIGONES2.3ANÁLISIS TÉRMICO DE HORMIGONES2.3ANÁLISIS TÉRMICO DE HORMIGONES2.32.3.1Hormigón poroso232.4DISCUSIÓN	ABSTRACT (ESPAÑOL)	xxxı
ESTRATTO ELABORATO IN ITALIANO       XXXV         CAPÍTULO 1       1         INTRODUCCIÓN       1         1.1       ANTECEDENTES       1         1.2       OBJETIVO       2         1.2.1       Objetivo general       2         1.2.2       Objetivo específicos       2         1.3       METODOLOGÍA       3         CAPÍTULO 2       5       5         ESTADO DEL ARTE       5         2.1       INTRODUCCIÓN       5         2.2       HORMIGÓN POROSO       5         2.2.1       Aspectos generales del hormigón poroso       13         2.2.3       Empleos del hormigón poroso       13         2.2.3       Empleos del hormigón poroso       13         2.3       ANÁLISIS TÉRMICO DE HORMIGONES       23         2.3.1       Hormigón poroso       23         2.4       DISCUSIÓN       33	ABSTRACT (ITALIANO)	xxxIII
CAPÍTULO 1       1         INTRODUCCIÓN       1         1.1       ANTECEDENTES         1.2       OBJETIVO         2       1.2.1         1.2.1       Objetivo general         2.2.2       Objetivo específicos         2       1.3         METODOLOGÍA       3         CAPÍTULO 2       5         ESTADO DEL ARTE       5         2.1       INTRODUCCIÓN       5         2.2       HORMIGÓN POROSO       5         2.2.1       Aspectos generales del hormigón poroso       6         2.2.2       Materiales del hormigón poroso       13         2.2.3       Empleos del hormigón poroso       13         2.3.1       Hormigón poroso       23         2.4       DISCUSIÓN       33	ESTRATTO ELABORATO IN ITALIANO	xxxv
INTRODUCCIÓN       1         1.1       ANTECEDENTES       1         1.2       OBJETIVO       2         1.2.1       Objetivo general       2         1.2.2       Objetivo específicos       2         1.3       METODOLOGÍA       3         CAPÍTULO 2       5         ESTADO DEL ARTE       5         2.1       INTRODUCCIÓN       5         2.2       HORMIGÓN POROSO       5         2.2.1       Aspectos generales del hormigón poroso.       66         2.2.2       Materiales del hormigón poroso.       13         2.2.3       Empleos del hormigón poroso.       13         2.3.1       Hormigón poroso.       23         2.3.1       Hormigón poroso.       23         2.4       DISCUSIÓN.       33	CAPÍTULO 1	1
1.1       ANTECEDENTES       1         1.2       OBJETIVO       2         1.2.1       Objetivo general       2         1.2.2       Objetivo específicos       2         1.3       METODOLOGÍA       3         CAPÍTULO 2         5         ESTADO DEL ARTE       5         2.1       INTRODUCCIÓN       5         2.2       HORMIGÓN POROSO       5         2.2.1       Aspectos generales del hormigón poroso       6         2.2.2       Materiales del hormigón poroso       13         2.2.3       Empleos del hormigón poroso       18         2.3       ANÁLISIS TÉRMICO DE HORMIGONES       23         2.4       DISCUSIÓN       33	INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 25ESTADO DEL ARTE52.1INTRODUCCIÓN52.2HORMIGÓN POROSO52.2.1Aspectos generales del hormigón poroso.62.2.2Materiales del hormigón poroso.132.2.3Empleos del hormigón poroso.182.3ANÁLISIS TÉRMICO DE HORMIGONES232.3.1Hormigón poroso.232.4DISCUSIÓN33	<ul> <li>1.1 ANTECEDENTES</li></ul>	
ESTADO DEL ARTE52.1INTRODUCCIÓN52.2HORMIGÓN POROSO52.2.1Aspectos generales del hormigón poroso62.2.2Materiales del hormigón poroso132.2.3Empleos del hormigón poroso182.3ANÁLISIS TÉRMICO DE HORMIGONES232.3.1Hormigón poroso232.4DISCUSIÓN33	CAPITULO 2	5
2.1INTRODUCCIÓN52.2HORMIGÓN POROSO52.2.1Aspectos generales del hormigón poroso62.2.2Materiales del hormigón poroso132.2.3Empleos del hormigón poroso182.3AnáLISIS TÉRMICO DE HORMIGONES232.3.1Hormigón poroso232.4DISCUSIÓN33	ESTADO DEL ARTE	5
2.2.1       Aspectos generales del hormigón poroso	<ul> <li>2.1 INTRODUCCIÓN</li> <li>2.2 HORMIGÓN POROSO</li> <li>3.2.1 Aspectos gaparales del hormigón poroso</li> </ul>	
2.3       ANÁLISIS TÉRMICO DE HORMIGONES	2.2.1 Aspectos generales del normigón poroso 2.2.2 Materiales del hormigón poroso 2.2.3 Empleos del hormigón poroso	
2.4 Discusión	2.3 Análisis térmico de Hormigones 2.3.1 Hormigón poroso	23
	2.4 DISCUSIÓN	

CAPÍTULO 3		35
MODELO DE	COMPACTACIÓN	35
3.1 IN	TRODUCCIÓN	35
3.1.1	Objetivo	36
3.1.2	Organización	36
3.2 D	ESCRIPCIÓN DEL MODELO UTILIZADO	37
3.2.1	Primer módulo – Caída aleatoria	38
3.2.2	Segundo módulo – Compactación medio compresión	41
3.3 P	ROCESO DE CREACIÓN MALLADO	43
3.3.1	Modelo de las partículas	43
3.3.2	Creación de los nodos y de las vigas	45
3.3.3	Análisis de los nodos y de las vigas	46
3.3.4	Verificaciones	48
3.4 D	SCUSIÓN	49
CAPÍTULO 4		51
MODELO TÉ	RMICO	51
4.1 IN	TRODUCCIÓN	51
4.2 E	EMENTOS TÉRMICOS	52
4.3 N	ECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	53
4.3.1	Conducción	53
4.3.2	Convección	53
4.4 A	NÁLISIS DE LOS MODELOS GENERADOS	54
CAPÍTULO 5		61
0,		OT.
PRESENTAC	ÓN DE LOS RESULTADOS	61
PRESENTACI	ÓN DE LOS RESULTADOS	<b>61</b>
5.1 IN 5.1.1	ÓN DE LOS RESULTADOS TRODUCCIÓN Obietivo	<b>61</b> 61
<b>PRESENTAC</b> 5.1 IN 5.1.1 5.1.2	ÓN DE LOS RESULTADOS TRODUCCIÓN Objetivo Oraanización	61 61 61 62
5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D	ÓN DE LOS RESULTADOS TRODUCCIÓN Objetivo Organización SEÑO.	61 61 61 62 62
PRESENTACI 5.1 In 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1	ÓN DE LOS RESULTADOS TRODUCCIÓN Objetivo Organización SEÑO Curva granulométrica y disposición de las partículas	61 61 61 62 62 62
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2	ÓN DE LOS RESULTADOS TRODUCCIÓN Objetivo Organización SEÑO Curva granulométrica y disposición de las partículas Compactación	61 61 62 62 62 62
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P	ÓN DE LOS RESULTADOS TRODUCCIÓN <i>Objetivo</i> <i>Organización</i> SEÑO <i>Curva granulométrica y disposición de las partículas</i> <i>Compactación</i> RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS	61 61 61 62 62 62 65 67
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1	ÓN DE LOS RESULTADOS TRODUCCIÓN Objetivo Organización SEÑO Curva granulométrica y disposición de las partículas Curva granulométrica y disposición de las partículas RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS Propiedades materiales utilizados por los modelos	61 61 61 62 62 62 65 67 68
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1 5.3.2	ÓN DE LOS RESULTADOS TRODUCCIÓN Objetivo Organización SEÑO Curva granulométrica y disposición de las partículas Curva granulométrica y disposición de las partículas Compactación RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS Propiedades materiales utilizados por los modelos Densidad (p)	61 61 61 62 62 62 65 67 68 69
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1 5.3.2 5.3.3	ÓN DE LOS RESULTADOS TRODUCCIÓN Objetivo Organización SEÑO. Curva granulométrica y disposición de las partículas Compactación RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS. Propiedades materiales utilizados por los modelos. Densidad (ρ) Calor específico (C <sub>esp</sub> )	61 61 61 62 62 65 65 67 68 69 82
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4	$\acute{ON}$ DE LOS RESULTADOS TRODUCCIÓN <i>Objetivo</i> <i>Organización</i> SEÑO <i>Curva granulométrica y disposición de las partículas</i> <i>Curva granulométrica y disposición de las partículas</i> <i>Compactación</i> RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS <i>Propiedades materiales utilizados por los modelos</i> <i>Densidad (ρ)</i> <i>Calor específico (C<sub>esp</sub>)</i> <i>Conductividad térmica (λ<sub>e</sub>)</i>	61 61 61 62 62 62 65 65 67 68 69 82 94
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5	$\acute{ON}$ DE LOS RESULTADOS TRODUCCIÓN <i>Objetivo</i> <i>Organización</i> SEÑO. <i>Curva granulométrica y disposición de las partículas</i> <i>Compactación</i> RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS. <i>Propiedades materiales utilizados por los modelos</i> . <i>Densidad (ρ)</i> . <i>Calor específico (C<sub>esp</sub>)</i> . <i>Conductividad térmica (λ<sub>e</sub>)</i> . <i>Difusividad térmica (α)</i>	61 61 62 62 62 65 67 68 69 82 94 31
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 CAPÍTULO 6	$\acute{ON}$ DE LOS RESULTADOS TRODUCCIÓN Objetivo Organización SEÑO Curva granulométrica y disposición de las partículas Compactación RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS Propiedades materiales utilizados por los modelos Densidad (ρ) Calor específico ( $C_{esp}$ ) Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) Difusividad térmica ( $\alpha$ )	61 61 62 62 65 67 68 69 82 94 31 55
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE	ÓN DE LOS RESULTADOS	61 61 62 62 62 65 67 68 69 82 94 31 55 55
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE 6.1 IN	ÓN DE LOS RESULTADOS         TRODUCCIÓN.         Objetivo         Organización         SEÑO.         Curva granulométrica y disposición de las partículas.         Compactación         RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS         Propiedades materiales utilizados por los modelos.         Densidad (ρ)         Calor específico (C <sub>esp</sub> )         Conductividad térmica (λ <sub>e</sub> )         Difusividad térmica (α)         1         LOS RESULTADOS         1         TRODUCCIÓN	61 61 62 62 62 65 67 68 69 82 94 31 55 55 55
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE 6.1 IN 6.2 D	ÓN DE LOS RESULTADOS         TRODUCCIÓN.         Objetivo         Organización         SEÑO.         Curva granulométrica y disposición de las partículas.         Compactación         RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS         Propiedades materiales utilizados por los modelos.         Densidad (ρ).         Calor específico (C <sub>esp</sub> ).         Conductividad térmica (λ <sub>e</sub> ).         Difusividad térmica (α)         1         LOS RESULTADOS         1         EPURACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.	61 61 62 62 62 65 67 68 69 82 94 31 55 55 55 55
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE 6.1 IN 6.2 D 6.2.1	ÓN DE LOS RESULTADOS         TRODUCCIÓN.         Objetivo         Organización         SEÑO.         Curva granulométrica y disposición de las partículas         Compactación         RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS.         Propiedades materiales utilizados por los modelos.         Densidad (p)         Calor específico (Cesp)         Conductividad térmica (λe)         Difusividad térmica (α)         1         LOS RESULTADOS         1         TRODUCCIÓN         1         Análisis estadístico de la densidad (ρ)         1	61 61 62 62 62 65 67 68 69 82 94 31 55 55 55 55 55
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE 6.1 IN 6.2 D 6.2.1 6.2.2	ÓN DE LOS RESULTADOS         TRODUCCIÓN         Objetivo         Organización         SEÑO         Curva granulométrica y disposición de las partículas         Compactación         RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS         Propiedades materiales utilizados por los modelos         Densidad (ρ)         Calor específico (C <sub>esp</sub> )         Conductividad térmica (λ <sub>e</sub> )         Difusividad térmica (α)         1         LOS RESULTADOS         1         PRODUCCIÓN         1         Análisis estadístico de la densidad (ρ)         1         Análisis estadístico para el calor específico (C <sub>t</sub> )	61 61 62 62 65 67 68 69 82 94 31 55 55 55 58 62
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE 6.1 IN 6.2 D 6.2.1 6.2.2 6.2.3	ÓN DE LOS RESULTADOS         TRODUCCIÓN.         Objetivo         Organización         SEÑO.         Curva granulométrica y disposición de las partículas.         Compactación         RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS         Propiedades materiales utilizados por los modelos.         Densidad (ρ)         Calor específico ( $C_{esp}$ )         Conductividad térmica ( $\lambda_e$ )         Difusividad térmica ( $\alpha$ )         1         LOS RESULTADOS         1         TRODUCCIÓN         1         PURACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.         1         Análisis estadístico de la densidad ( $\rho$ )         1         Análisis estadístico para el calor específico ( $C_t$ )         1         Análisis estadístico para la conductividad térmica ( $\lambda_e$ )	61 61 62 62 65 67 68 69 82 94 31 55 55 55 55 56 56 62 66
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE 6.1 IN 6.2 D 6.2.1 6.2.2 6.2.3 6.2.4	ÓN DE LOS RESULTADOS         TRODUCCIÓN         Objetivo         Organización         SEÑO         Curva granulométrica y disposición de las partículas         Compactación         RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS         Propiedades materiales utilizados por los modelos         Densidad (ρ)         Calor específico (C <sub>esp</sub> )         Conductividad térmica ( $\alpha$ )         1         LOS RESULTADOS         1         LOS RESULTADOS         1         ProDuccióN         1         Análisis estadístico de la densidad (ρ)         1         Análisis estadístico para el calor específico ( $C_t$ )         1         Análisis estadístico para la difusividad térmica ( $\alpha$ )	<b>61</b> 61 62 62 65 67 68 69 82 93 1 <b>55</b> 55 55 55 66 74
PRESENTACI 5.1 IN 5.1.1 5.1.2 5.2 D 5.2.1 5.2.2 5.3 P 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE 6.1 IN 6.2 D 6.2.1 6.2.2 6.2.3 6.2.4 6.3 D	ÓN DE LOS RESULTADOS         TRODUCCIÓN         Objetivo         Organización         SEÑO         Curva granulométrica y disposición de las partículas         Compactación         RESENTACIONES DE LOS RESULTADOS         Propiedades materiales utilizados por los modelos         Densidad ( $\rho$ )         Calor específico (C <sub>esp</sub> )         Conductividad térmica ( $\lambda_e$ )         Difusividad térmica ( $\alpha$ )         1         LOS RESULTADOS         1         Propiedades materiales utilizados por los modelos         Densidad ( $\rho$ )         Canductividad térmica ( $\lambda_e$ )         Difusividad térmica ( $\alpha$ )         1         LOS RESULTADOS         1         Propuención         1         LOS RESULTADOS         1         LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES         1         Análisis estadístico para el calor específico ( $C_1$ )         1         Análisis estadístico para el calor específico ( $C_1$ )         1         Análisis estadístico para la conductividad térmica ( $\lambda$ e)         1         Análisis estadístico para la conductividad térmica ( $\lambda$ e)         1 <t< td=""><td><b>61</b> 61 61 62 62 65 67 68 931 <b>55</b> 556 556 556 667 482 667 74 82</td></t<>	<b>61</b> 61 61 62 62 65 67 68 931 <b>55</b> 556 556 556 667 482 667 74 82

6.3.2 Recta tendencia para calor especifico (C <sub>t</sub> )	
6.3.3 Recta tendencia para la conductividad térmica ( $\lambda_e$ )	
6.3.4 Recta tendencia para la difusividad térmica (α)	
6.4 COMPARACIÓN DE LAS RECTAS DE TENDENCIA	224
6.4.1 Calor específico (Ct)	
6.4.2 Densidad (ρ)	
6.4.3 Conductividad térmica ( $\lambda_e$ )	
6.4.4 Difusividad térmica (α)	
6.5 Discusión	235
	227
CONCLUSIONES	237
7.1 INTRODUCCIÓN	237
7.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS	237
7.2.1 Densidad (ρ)	
7.2.2 Calor especifico (C <sub>t</sub> )	239
7.2.3 Conductividad térmica ( $\lambda_e$ )	
7.2.4 Difusividad térmica (α)	
7.3 CONCLUSIONES GENERALES	249
7.3.1 Conclusiones relativas al utilizo de diferentes curvas granulomét	ricas249
7.3.2 Conclusiones relativas al grado de compactación de los modelos	
7.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	252
BIBI IOGRAFÍA	255
AGRADECIMIENTOS	

# ÍNDICE DE LAS FIGURAS

e le persone
Figura 2: esempio di isola di calore urbana.       XXXVI         Figura 3: Approssimazione del comportamento termico di un materiale poroso in serie o       XXXVIII         Figura 4: Traiettorie per il trasferimento del calore nel singolo elemento di calcestruzzo       XXXIX         Figura 5: rappresentazione schematica dell'elemento studiato.       XL         Figura 6: tipi di relazione tra gli elementi: nessun contatto (a), contatto tra la pasta di       XL         Figura 7: Filosofia del modello utilizzato.       XLI         Figura 8: sequenza per il completamento del primo modulo, (a) primo passo, (b) secondo       XLII         Figura 9: Applicazione dell'algoritmo per un modello, si mostrano i diversi gradi di       XLI
Figura 3: Approssimazione del comportamento termico di un materiale poroso in serie o         in parallelo.       XXXVIII         Figura 4: Traiettorie per il trasferimento del calore nel singolo elemento di calcestruzzo       poroso.         poroso.       XXXIX         Figura 5: rappresentazione schematica dell'elemento studiato.       XL         Figura 6: tipi di relazione tra gli elementi: nessun contatto (a), contatto tra la pasta di       xL         Figura 7: Filosofia del modello utilizzato.       XLI         Figura 8: sequenza per il completamento del primo modulo, (a) primo passo, (b) secondo       passo, (c) terzo passo.         XLII       Figura 9: Applicazione dell'algoritmo per un modello, si mostrano i diversi gradi di
in paralleloXXXVIII Figura 4: Traiettorie per il trasferimento del calore nel singolo elemento di calcestruzzo porosoXXIX Figura 5: rappresentazione schematica dell'elemento studiatoXL Figura 6: tipi di relazione tra gli elementi: nessun contatto (a), contatto tra la pasta di cemento (b), sovrapposizione della pasta di cemento (c), contatto tra gli inerti (d)XL Figura 7: Filosofia del modello utilizzatoXLI Figura 8: sequenza per il completamento del primo modulo, (a) primo passo, (b) secondo passo, (c) terzo passoXLII Figura 9: Applicazione dell'algoritmo per un modello, si mostrano i diversi gradi di
Figura 4: Traiettorie per il trasferimento del calore nel singolo elemento di calcestruzzo         poroso.       XXXIX         Figura 5: rappresentazione schematica dell'elemento studiato.       XL         Figura 6: tipi di relazione tra gli elementi: nessun contatto (a), contatto tra la pasta di       XL         Figura 7: Filosofia del modello utilizzato.       XLI         Figura 8: sequenza per il completamento del primo modulo, (a) primo passo, (b) secondo       XLII         Figura 9: Applicazione dell'algoritmo per un modello, si mostrano i diversi gradi di       XLI
porosoXXXIX Figura 5: rappresentazione schematica dell'elemento studiatoXL Figura 6: tipi di relazione tra gli elementi: nessun contatto (a), contatto tra la pasta di cemento (b), sovrapposizione della pasta di cemento (c), contatto tra gli inerti (d)XL Figura 7: Filosofia del modello utilizzatoXLI Figura 8: sequenza per il completamento del primo modulo, (a) primo passo, (b) secondo passo, (c) terzo passoXLI Figura 9: Applicazione dell'algoritmo per un modello, si mostrano i diversi gradi di
Figura 5: rappresentazione schematica dell'elemento studiato.XLFigura 6: tipi di relazione tra gli elementi: nessun contatto (a), contatto tra la pasta dicemento (b), sovrapposizione della pasta di cemento (c), contatto tra gli inerti (d).XLFigura 7: Filosofia del modello utilizzato.XLIFigura 8: sequenza per il completamento del primo modulo, (a) primo passo, (b) secondoXLIIFigura 9: Applicazione dell'algoritmo per un modello, si mostrano i diversi gradi di
Figura 6: tipi di relazione tra gli elementi: nessun contatto (a), contatto tra la pasta di cemento (b), sovrapposizione della pasta di cemento (c), contatto tra gli inerti (d)XL Figura 7: Filosofia del modello utilizzatoXLI Figura 8: sequenza per il completamento del primo modulo, (a) primo passo, (b) secondo passo, (c) terzo passoXLI Figura 9: Applicazione dell'algoritmo per un modello, si mostrano i diversi gradi di
cemento (b), sovrapposizione della pasta di cemento (c), contatto tra gli inerti (d)XL Figura 7: Filosofia del modello utilizzatoXLI Figura 8: sequenza per il completamento del primo modulo, (a) primo passo, (b) secondo passo, (c) terzo passoXLII Figura 9: Applicazione dell'algoritmo per un modello, si mostrano i diversi gradi di
Figura 7: Filosofia del modello utilizzatoXLI Figura 8: sequenza per il completamento del primo modulo, (a) primo passo, (b) secondo passo, (c) terzo passoXLII Figura 9: Applicazione dell'algoritmo per un modello, si mostrano i diversi gradi di
Figura 8: sequenza per il completamento del primo modulo, (a) primo passo, (b) secondo passo, (c) terzo passoXLII Figura 9: Applicazione dell'algoritmo per un modello, si mostrano i diversi gradi di
passo, (c) terzo passoXLII Figura 9: Applicazione dell'algoritmo per un modello, si mostrano i diversi gradi di
Figura 9: Applicazione dell'algoritmo per un modello, si mostrano i diversi gradi di
compattazione per lo stesso: (a) 5% di compattazione, (b) 10%, (c) 15%, (d) 20%XLIII
Figura 10: elemento PLANE-55XLIV
Figura 11: condizioni al contorno applicate ai modelli generati precedentementeXLVI
Figura 12: scala di riferimento per i valori di temperatura nei modelliXLVII
Figura 13: andamento tipico delle temperature nei modelli analizzatiXLVIII
Figura 14: rappresentazione del flusso di calore dovuto al salto termico impostoXLVIII
Figura 15: retta di tendenza generale per quanto riguarda la densità (ρ) del calcestruzzo
porosoL
Figura 16: retta di tendenza generale per quanto riguarda il calore specifico (Ct) del
calcestruzzo porosoLI
Figura 17: retta di tendenza generale per quanto riguarda la conducibilità termica (λe) del
calcestruzzo poroso con flusso di calore in direzione YLII
Figura 18: retta di tendenza generale per quanto riguarda la conducibilità termica (λe) del
calcestruzzo poroso con flusso di calore in direzione X LIII
Figura 19: relazione tra le rette tendenza in funzione della direzione del flusso di calore.LIV
Figura 20: retta di tendenza generale per quanto riguarda la diffusività termica ( $lpha$ ) del
calcestruzzo poroso con flusso di calore in direzione YLV
Figura 21: retta di tendenza generale per quanto riguarda la diffusività termica ( $lpha$ ) del
calcestruzzo poroso con flusso di calore in direzione XLVI
Figura 22: relazione tra le rette tendenza in funzione della direzione del flusso di calore.
LVII
Figura 2.1: infiltración de agua en hormigón poroso6
Figura 2.2: Probetas cilíndricas elaboradas con hormigón de alta permeabilidad para
evidenciar la elevada presencia de vacíos en la mezcla7

Figura 5.6: representación de los valores de densidad ( $\rho$ ) por la curva granulométrica 1
(100% - 0%)
Figura 5.7: representación de los valores de densidad (ρ) por la curva granulométrica 2 (90% - 10%).
Figura 5.8: representación de los valores de densidad (o) nor la curva granulométrica 3
(80% - 20%)
Figura 5.9: representación de los valores de densidad (ρ) por la curva granulométrica 4
(/0% - 30%)
Figura 5.10: representación de los valores de densidad (ρ) por la curva granulométrica 5
(60% - 40%)
Figura 5.11: representación de los valores de densidad (ρ) por la curva granulométrica 6
(50% - 50%)
Figura 5.12: representación de los valores de densidad (ρ) por la curva granulométrica 7
(40% - 60%)
Figura 5.13: representación de los valores de densidad (ρ) por la curva granulométrica 8
(30% - 70%)
Figura 5.14: representación de los valores de densidad (ρ) por la curva granulométrica 9
(20% - 80%)
Figura 5.15: representación de los valores de densidad (ρ) por la curva granulométrica 10
(10% - 90%)
Figura 5.16: representación de los valores de densidad (ρ) por la curva granulométrica 11
(0% - 100%)81
Figura 5.17: representación de los valores de calor especifico (C <sub>t</sub> ) por la curva
granulométrica 1 (100%-0%)83
Figura 5.18: representación de los valores de calor especifico (C <sub>t</sub> ) por la curva
granulométrica 2 (90%-10%)84
Figura 5.19: representación de los valores de calor especifico (C <sub>t</sub> ) por la curva
granulométrica 3 (80%-20%)85
Figura 5.20: representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva
granulométrica 4 (70%-30%)86
Figura 5.21: representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva
granulométrica 5 (60%-40%)87
Figura 5.22: representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva
granulométrica 6 (50%-50%)88
Figura 5.23: representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva
granulométrica 7 (40%-60%)89
Figura 5.24: representación de los valores de calor especifico ( $C_t$ ) por la curva
granulométrica 8 (30%-70%)90
Figura 5.25: representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva
granulométrica 9 (20%-80%)91
Figura 5.26: representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva
granulométrica 10 (10%-90%)92
Figura 5.27: representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva
granulométrica 11 (0%-100%)93

Figura 5.28: Valores de conductividad térmica de los principales materiales94
Figura 5.29: esquema de calentamiento de los modelos
Figura 5.30: escala de referencia para la lectura de los valores de temperatura en los
modelos
Figura 5.31: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_{e}$ ) por la curva
granulométrica 1 (100%-0%) en dirección Y 98
Figura 5.32: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_1$ ) nor la curva
granulomátrica 1 (100%-0%) en dirección X 00
Figure 5.22. Andemiento de la temperatura en las des direcciones principales en el modelo
Figura 5.55: Antualmento de la temperatura en las dos un ecclones principales en el modelo $(1.100)$ con diferentes gradas de composto sión 100
G-1 de la cui va granulometrica 2 (90% - 10%), con diferentes grados de compactación. 100
Figura 5.34: representation de los valores de conductividad termica ( $\Lambda_e$ ) por la curva
granulometrica 2 (90%-10%) en dirección Y
Figura 5.35: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva
granulométrica 2 (90%-10%) en dirección X
Figura 5.36: Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo
G-6 de la curva granulométrica 2 (90% - 10%), con diferentes grados de compactación. 103
Figura 5.37: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva
granulométrica 3 (80%-20%) en dirección Y104
Figura 5.38: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva
granulométrica 3 (80%-20%) en dirección X105
Figura 5.39: Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo
G-16 de la curva granulométrica 3 (80% - 20%), con diferentes grados de compactación.
Figura 5.40: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva
granulométrica 4 (70%-30%) en dirección Y107
Figura 5.41: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva
granulométrica 4 (70%-30%) en dirección X
Figura 5.42: Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo
G-45 de la curva granulométrica 4 (70% - 30%), con diferentes grados de compactación.
Figura 5.43: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_{c}$ ) por la curva
granulométrica 5 (60%-40%) en dirección Y
Figure 5.44: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda$ ) por la curva
a construction a constructin a construction a construction a construction a con
Figure 5 45. Andemiento de la temperatura en las des direcciones principales en el modelo
Figura 5.45. Antualmento de la temperatura en las dos un ecclones principales en el modelo $(22)$ de la surva granulométrica E (60% 40%), con diferentes grades de compactación
G-25 de la cui va grandiometrica 5 (60% - 40%), con diferentes grados de compactación.
$\mathbf{F}_{i}$
Figura 5.40: representación de los valores de conductividad termica ( $\Lambda_e$ ) por la curva
granuometrica o $(50\%-50\%)$ en dirección Y113
Figura 5.4/: representacion de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva
granulometrica 6 (50%-50%) en dirección X
Figura 5.48: Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo
G-9 de la curva granulométrica 6 (50% - 50%), con diferentes grados de compactación. 115

Figura 5.49: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 7 (40%-60%) en dirección Y
Figura 5.50: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 7 (40%-60%) en dirección X
Figura 5.51: Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo G-26 de la curva granulométrica 7 (40% - 60%), con diferentes grados de compactación.
Figura 5.52: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 8 (30%-70%) en dirección Y
Figura 5.53: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 8 (30%-70%) en dirección X
Figura 5.54: Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo G-19 de la curva granulométrica 8 (30% - 70%), con diferentes grados de compactación. 
Figura 5.55: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 9 (20%-80%) en dirección Y
Figura 5.56: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 9 (20%-80%) en dirección X
Figura 5.57: Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo G-15 de la curva granulométrica 9 (20% - 80%), con diferentes grados de compactación.
Figura 5.58: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 10 (10%-90%) en dirección Y
Figura 5.59: representación de los valores de conductividad térmica (λ <sub>e</sub> ) por la curva granulométrica 10 (10%-90%) en dirección X126
Figura 5.60: Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo G-22 de la curva granulométrica 10 (10% - 90%), con diferentes grados de compactación.
Figura 5.61: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 11 (0%-100%) en dirección Y
Figura 5.62: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 11 (0%-100%) en dirección X129
Figura 5.63: Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo G-37 de la curva granulométrica 11 (0% - 100%), con diferentes grados de compactación. 
Figura 5.64: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva granulométrica 1 (100%-0%) en dirección Y 132
Figura 5.65: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 1 (100%-0%) en dirección X133 Figura 5.66: representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva
granulométrica 2 (90%-10%) en dirección Y134
Figura 5.67: representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curvagranulométrica 2(90%-10%) en dirección X135

Figura 5.68: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 3 (80%-20%) en dirección Y136
Figura 5.69: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 3 (80%-20%) en dirección X137
Figura 5.70: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 4 (70%-30%) en dirección Y138
Figura 5.71: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 4 (70%-30%) en dirección X139
Figura 5.72: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 5 (60%-40%) en dirección Y140
Figura 5.73: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 5 (60%-40%) en dirección X141
Figura 5.74: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 6 (50%-50%) en dirección Y142
Figura 5.75: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 6 (50%-50%) en dirección X143
Figura 5.76: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 7 (40%-60%) en dirección Y144
Figura 5.77: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 7 (40%-60%) en dirección X145
Figura 5.78: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 8 (30%-70%) en dirección Y146
Figura 5.79: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 8 (30%-70%) en dirección X147
Figura 5.80: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 9 (20%-80%) en dirección Y148
Figura 5.81: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 9 (20%-80%) en dirección X149
Figura 5.82: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 10 (10%-90%) en dirección Y150
Figura 5.83: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 10 (10%-90%) en dirección X151
Figura 5.84: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 11 (0%-100%) en dirección Y152
Figura 5.85: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva
granulométrica 11(0%-100%) en dirección X153
Figura 6.1: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por
la curva granulométrica 1 (100% - 0%)
Figura 6.2: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por
la curva granulométrica 2 (90% - 10%)
Figura 6.3: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por
la curva granulométrica 3 (80% - 20%)
Figura 6.4: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por
la curva granulométrica 4 (70% - 30%)

Figura 6.5: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por
la curva granulométrica 5 (60% - 40%)186
Figura 6.6: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por
la curva granulométrica 6 (50% - 50%)187
Figura 6.7: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por
la curva granulométrica 7 (40% - 60%)187
Figura 6.8: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por
la curva granulométrica 8 (30% - 70%)
Figura 6.9: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por
la curva granulométrica 9 (20% - 80%)
Figura 6.10: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 10 (10% - 90%)
Figura 6.11: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 11 (0% - 100%)
Figura 6.12: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 1 (100% - 0%)
Figura 6.13: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 2 (90% - 10%)
Figura 6.14: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 3 (80% - 20%)192
Figura 6.15: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 4 (70% - 30%)193
Figura 6.16: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 5 (60% - 40%)193
Figura 6.17: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 6 (50% - 50%)194
Figura 6.18: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 7 (40% - 60%)194
Figura 6.19: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 8 (30% - 70%)195
Figura 6.20: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 9 (20% - 80%)195
Figura 6.21: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 10 (10% - 90%)196
Figura 6.22: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 11 (0% - 100%)196
Figura 6.23: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 1 (100% - 0%) en dirección X198
Figura 6.24: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 1 (100% - 0%) en dirección Y
Figura 6.25: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 2 (90% - 10%) en dirección X199
Figura 6.26: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 2 (90% - 10%) en dirección Y200

Figura 6.27: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 3 (80% - 20%) en dirección X200
Figura 6.28: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 3 (80% - 20%) en dirección Y201
Figura 6.29: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 4 (70% - 30%) en dirección X201
Figura 6.30: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 4 (70% - 30%) en dirección Y202
Figura 6.31: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 5 (60% - 40%) en dirección X
Figura 6.32: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 5 (60% - 40%) en dirección Y
Figura 6.33: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 6 (50% - 50%) en dirección X
Figura 6.34: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 6 (50% - 50%) en dirección Y
Figura 6.35: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 7 (40% - 60%) en dirección X
Figura 6.36: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 7 (40% - 60%) en dirección Y
Figura 6.37: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 8 (30% - 70%) en dirección X
Figura 6.38: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 8 (30% - 70%) en dirección Y
Figura 6.39: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 9 (20% - 80%) en dirección X
Figura 6.40: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 9 (20% - 80%) en dirección Y
Figura 6.41: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 10 (10% - 90%) en dirección X
Figura 6.42: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 10 (10% - 90%) en dirección Y
Figura 6.43: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 11 (0% - 100%) en dirección X
Figura 6.44: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 11 (0% - 100%) en dirección Y
Figura 6.45: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 1 (100% - 0%) en dirección X
Figura 6.46: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 1 (100% - 0%) en dirección Y
Figura 6.47: Representación de la recta tendencia. su ecuación v su desviación estándar
por la curva granulométrica 2 (90% - 10%) en dirección X
Figura 6.48: Representación de la recta tendencia. su ecuación v su desviación estándar
por la curva granulométrica 2 (90% - 10%) en dirección Y
r

Figura 6.49: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 3 (80% - 20%) en dirección X213
Figura 6.50: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 3 (80% - 20%) en dirección Y214
Figura 6.51: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 4 (70% - 30%) en dirección X214
Figura 6.52: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 4 (70% - 30%) en dirección Y215
Figura 6.53: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 5 (60% - 40%) en dirección X215
Figura 6.54: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 5 (60% - 40%) en dirección Y216
Figura 6.55: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 6 (50% - 50%) en dirección X216
Figura 6.56: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 6 (50% - 50%) en dirección Y217
Figura 6.57: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 7 (40% - 60%) en dirección X217
Figura 6.58: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 7 (40% - 60%) en dirección Y218
Figura 6.59: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 8 (30% - 70%) en dirección X218
Figura 6.60: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 8 (30% - 70%) en dirección Y219
Figura 6.61: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 9 (20% - 80%) en dirección X219
Figura 6.62: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 9 (20% - 80%) en dirección Y220
Figura 6.63: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 10 (10% - 90%) en dirección X220
Figura 6.64: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 10 (10% - 90%) en dirección Y221
Figura 6.65: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 11 (0% - 100%) en dirección X221
Figura 6.66: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar
por la curva granulométrica 11 (0% - 100%) en dirección Y222
Figura 6.67: Comparación de las rectas de tendencia de todas las curvas granulométrica
por la propiedad de calor especifico (Ct)224
Figura 6.68: Comparación de las rectas de tendencia de todas las curvas granulométrica
por la propiedad de densidad (ρ)225
Figura 6.69: Comparación de las rectas de tendencia de todas las curvas granulométrica
por la propiedad de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) con flujo de calor en dirección Y227
Figura 6.70: Comparación de las rectas de tendencia de todas las curvas granulométrica
por la propiedad de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) con flujo de calor en dirección X228

Figura 6.71: Recta tendencia por la conductividad térmica del HoPo en dirección Y 230
Figura 6.72: Recta tendencia por la conductividad térmica del HoPo en dirección X 230
Figura 6.73: Comparación de las rectas de tendencia de todas las curvas granulométrica
por la propiedad de difusividad térmica ( $\alpha$ ) con flujo de calor en dirección Y232
Figura 6.74: Comparación de las rectas de tendencia de todas las curvas granulométrica
por la propiedad de difusividad térmica ( $\alpha$ ) con flujo de calor en dirección X233
Figura 7.1: Recta de tendencia general por la propiedad de densidad ( $\rho$ ) del HoPo238
Figura 7.2: Recta de tendencia general por la propiedad de calor especifico (Ct) del HoPo.
Figura 7.3: Recta de tendencia general por la propiedad de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) del
HoPo con flujo de calor en dirección Y242
Figura 7.4: Recta de tendencia general por la propiedad de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) del
HoPo con flujo de calor en dirección X243
Figura 7.5: Recta de tendencia general por la propiedad de difusividad térmica ( $\alpha$ ) del
HoPo con flujo de calor en dirección Y246
Figura 7.6: Recta de tendencia general por la propiedad de difusividad térmica ( $\alpha$ ) del
HoPo con flujo de calor en dirección X247

# ÍNDICE DE LAS TABLAS

Tabla 2.1: Tamaños de los poros en el hormigón poroso
Tabla 2.2: Propiedades de las principales rocas naturales utilizadas en la construcción
(normativa UNI 10351)15
Tabla 2.3: Forma de los áridos y sus propiedades de empaquetamiento [11]25
Tabla 2.4: Resultados experimentales de medición de la conductividad térmica del
hormigón poroso utilizando el método del hilo caliente [11]32
Tabla 4.1: Tipos de elementos para análisis térmicos
Tabla 5.1: Contenido en porcentaje de los diferentes áridos por cada curva granulométrica.
Tabla 5.2: Propiedades de los elementos utilizados por la creación de los modelos68
Tabla 5.3: Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m <sup>3</sup> de la curva granulométrica 1 (100% - 0%)71
Tabla 5.4: Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m <sup>3</sup> de la curva granulométrica 2 (90% - 10%)72
Tabla 5.5: Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m <sup>3</sup> de la curva granulométrica 3 (80% - 20%)73
Tabla 5.6: Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m <sup>3</sup> de la curva granulométrica 4 (70% - 30%)74
Tabla 5.7: Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m <sup>3</sup> de la curva granulométrica 5 (60% - 40%)75
Tabla 5.8: Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m <sup>3</sup> de la curva granulométrica 6 (50% - 50%)76
Tabla 5.9: Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m <sup>3</sup> de la curva granulométrica 7 (40% - 60%)77
Tabla 5.10: Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m <sup>3</sup> de la curva granulométrica 8 (30% - 70%)78
Tabla 5.11: Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m <sup>3</sup> de la curva granulométrica 9 (20% - 80%)79
Tabla 5.12: Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m <sup>3</sup> de la curva granulométrica 10 (10% - 90%)80
Tabla 5.13: Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m <sup>3</sup> de la curva granulométrica 11 (0% - 100%)81
Tabla 5.14: Calor específico (C <sub>tot</sub> ) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 1 (100% -
0%)83
Tabla 5.15: Calor específico ( $C_{tot}$ ) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 2 (90% -
10%)
Tabla 5.16: Calor específico ( $C_{tot}$ ) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 3 (80% -
20%)85
Tabla 5.17: Calor específico (C <sub>tot</sub> ) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 4 (70% -
30%)
Tabla 5.18: Calor específico (C <sub>tot</sub> ) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 5 (60% -
40%)
Tabla 5.19: Calor específico (C <sub>tot</sub> ) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 6 (50% -
50%)
Tabla 5.20: Calor específico (C <sub>tot</sub> ) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 7 (40% -
60%)
Tabla 5.21: Calor específico (C <sub>tot</sub> ) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 8 (30% -
70%)90

Tabla 5.22: Calor específico ( $C_{tot}$ ) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 9 (20% -
80%)91
Tabla 5.23: Calor específico (C <sub>tot</sub> ) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 10 (10% -
90%)92
Tabla 5.24: Calor específico ( $C_{tot}$ ) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 11 (0% -
100%)
Tabla 5.25: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 1
(100% - 0%) en dirección Y98
Tabla 5.26: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 1
(100% - 0%) en dirección X
Tabla 5.27: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 2
(90% - 10%) en dirección Y
Tabla 5.28: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 2
(90% - 10%) en dirección X
Tabla 5.29: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 3
(80% - 20%) en dirección Y
Tabla 5.30: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 3
(80% - 20%) en dirección X
Tabla 5.31: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 4
(70% - 30%) en dirección Y
Tabla 5.32: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 4
(70% - 30%) en dirección X
Tabla 5.33: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 5
(60% - 40%) en dirección Y
Tabla 5.34: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 5
(60% - 40%) en dirección X
Tabla 5.35: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 6
(50% - 50%) en dirección Y
Tabla 5.36: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 6
(50% - 50%) en dirección X
Tabla 5.37: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 7
(40% - 60%) en dirección Y
Tabla 5.38: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 7
(40% - 60%) en dirección X
Tabla 5.39: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 8
(30% - 70%) en dirección Y
Tabla 5.40: Conductividad térmica ( $\lambda_0$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 8
(30% - 70%) en dirección X
Tabla 5.41: Conductividad térmica ( $\lambda_{e}$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 9
(20% - 80%) en dirección Y
Tabla 5.42: Conductividad térmica ( $\lambda_0$ ) express en W/mK de la curva granulométrica 9
(20% - 80%) en dirección X
Tabla 5.43: Conductividad térmica ( $\lambda_a$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 10
(10% - 90%) en dirección Y (125
(20,0) = 0.000000000000000000000000000000000

Tabla 5.44: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 10
(10% - 90%) en dirección X
Tabla 5.45: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 11
(0% - 100%) en dirección Y128
Tabla 5.46: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 11
(0% - 100%) en dirección X129
Tabla 5.47: Propiedades térmicas de algunos materiales [40]131
Tabla 5.48: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 1 (100%)
- 0%) en dirección Y132
Tabla 5.49: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 1 (100%)
- 0%) en dirección X
Tabla 5.50: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 2 (90% -
10%) en dirección Y
Tabla 5.51: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 2 (90% -
10%) en dirección X
Tabla 5.52: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 3 (80% -
20%) en dirección Y
Tabla 5.53: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 3 (80% -
20%) en dirección X
Tabla 5.54: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 4 (70% -
30%) en dirección Y
Tabla 5.55: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 4 (70% -
30%) en dirección X
Tabla 5.56: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 5 (60% -
40%) en dirección Y
Tabla 5.57: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 5 (60% -
40%) en dirección X
Tabla 5.58: Difusividad termica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulometrica 6 (50% -
50%) en dirección Y
Tabla 5.59: Difusividad termica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulometrica 6 (50% -
50%) en dirección X
Tabla 5.60: Difusividad termica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulometrica / (40% -
50%) en dirección Y
Tabla 5.61: Difusividad termica ( $\alpha$ ) express en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulometrica / (40% - 60%) en dirección X
50%) en difección A
Tabla 5.62: Difusividad termica ( $\alpha$ ) express en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulometrica 8 (30% - 70%) en dirección V
Table 5.63: Difusivided térmice ( $\alpha$ ) everys an mm <sup>2</sup> /s de la surve granulométrice 9.(200/
70%) on dirección Y
Table 5.64: Difusivided térmice ( $\alpha$ ) everys an mm <sup>2</sup> /s de la surve granulométrice 0.(200/
140% and $3.0%$ . Distributed termined (u) express en inne/s de la cuiva granulometrica 9 (20% - 80%) an dirección V
Table 5.65. Difusivided térmice ( $\alpha$ ) express on $mm^2/s$ de la surve granulométrice 0.(2004
1400 an direction X
149 to 70 to 10 to 20 to 10 to 20 to

Tabla 5.66: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 10 (10%
- 90%) en dirección Y150
Tabla 5.67: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 10 (10%)
- 90%) en dirección X151
Tabla 5.68: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 11 (0% -
100%) en dirección Y152
Tabla 5.69: Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm <sup>2</sup> /s de la curva granulométrica 11 (0% -
100%) en dirección X
Tabla 6.1: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 1 (100% - 0%).
Tabla 6.2: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 2 (90% - 10%).
Tabla 6.3: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 3 (80% - 20%).
159
Tabla 6 4: Valores estadísticos de la densidad nor la curva granulométrica 4 (70% - 30%)
Tabla 6 5: Valores estadísticos de la densidad nor la curva granulométrica 5 (60% - 40%)
1 a b a 0.5. valores estadísticos de la densidad por la curva grandiometrica 5 (00% - 40%).
Toble ( ( Malaya and dation data data data data data data data dat
Tabla 6.6: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulometrica 6 (50% - 50%).
Tabla 6.7: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 7 (40% - 60%).
Tabla 6.8: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 8 (30% - 70%).
Tabla 6.9: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 9 (20% - 80%).
Tabla 6.10: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 10 (10% -
90%)161
Tabla 6.11: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 11 (0% -
100%)
Tabla 6.12: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 1 (100% -
0%)162
Tabla 6.13: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 2 (90% -
10%)
Tabla 6.14: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 3 (80% -
20%)
Tabla 6.15: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 4 (70% -
30%)
Tabla 6.16: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 5 (60% -
40%)
Tabla 6.17: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 6.(50% -
50%)
Tabla 6 18: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 7 (40% -
60%

Tabla 6.19: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 8 (30% -
70%)165
Tabla 6.20: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 9 (20% -
80%)165
Tabla 6.21: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 10 (10% -
90%)165
Tabla 6.22: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 11 (0% -
100%)
Tabla 6.23: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 1
(100% - 0%) en dirección Y
Tabla 6.24: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 1
(100% - 0%) en dirección X
Tabla 6.25: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 2
(90% - 10%) en dirección Y
Tabla 6.26: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 2
(90% - 10%) en dirección X
Tabla 6.27: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 3
(80% - 20%) en dirección Y
Tabla 6.28: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 3
(80% - 20%) en dirección X
Tabla 6.29: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 4
(70% - 30%) en dirección Y
Tabla 6.30: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 4
(70% - 30%) en dirección X
Tabla 6.31: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 5
(60% - 40%) en dirección Y
Tabla 6.32: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 5
(60% - 40%) en dirección X
Tabla 6.33: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 6
(50% - 50%) en dirección Y
Tabla 6.34: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 6
(50% - 50%) en dirección X
Tabla 6.35: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 7
(40% - 60%) en dirección Y
Tabla 6.36: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 7
(40% - 60%) en dirección X
Tabla 6.37: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 8
(30% - 70%) en dirección Y
Tabla 6.38: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 8
(30% - 70%) en dirección X
Tabla 6.39: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 9
(20% - 80%) en dirección Y
Tabla 6.40: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 9
(20% - 80%) en dirección X

Tabla 6.41: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 10
(10% - 90%) en dirección Y
Tabla 6.42: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 10
(10% - 90%) en dirección X
Tabla 6.43: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 11
(0% - 100%) en dirección Y
Tabla 6.44: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 11
(0% - 100%) en dirección X
Tabla 6.45: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 1
(100% - 0%) en dirección Y
Tabla 6.46: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 1
(100% - 0%) en dirección X
Tabla 6.47: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 2
(90% - 10%) en dirección Y
Tabla 6.48: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 2
(90% - 10%) en dirección X
Tabla 6.49: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 3
(80% - 20%) en dirección Y
Tabla 6.50: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 3
(80% - 20%) en dirección X
Tabla 6.51: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 4
(70% - 30%) en dirección Y
Tabla 6.52: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 4
(70% - 30%) en dirección X
Tabla 6.53: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 5
(60% - 40%) en dirección Y
Tabla 6.54: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 5
(60% - 40%) en dirección X
Tabla 6.55: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 6
(50% - 50%) en dirección Y
Tabla 6.56: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 6
(50% - 50%) en dirección X
Tabla 6.57: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 7
(40% - 60%) en dirección Y
Tabla 6.58: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 7
(40% - 60%) en dirección X
Tabla 6.59: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 8
(30% - 70%) en dirección Y
Tabla 6.60: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 8
(30% - 70%) en dirección X
Tabla 6.61: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 9
(20% - 80%) en dirección Y
Tabla 6.62: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 9
(20% - 80%) en dirección X180

Tabla 6.63: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 10	
(10% - 90%) en dirección Y	.180
Tabla 6.64: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 10	
(10% - 90%) en dirección X	.180
Tabla 6.65: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 11	
(0% - 100%) en dirección Y	.181
Tabla 6.66: Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 11	
(0% - 100%) en dirección X	.181
Tabla 7.1: comparación entre los resultados del mismo modelo con dirección de los fluj	os
diferentes	.250

# ÍNDICE DE LOS CODIGOS

Código 4.1: Archivo de salida del algoritmo utilizado......56

#### INTEGRATED EVALUATION MODEL OF THE COMPACTION OF THE THERMAL PROPERTIES OF PERVIOUS CONCRETE

#### Author: Marco Binfarè

#### Tutor: Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro / Liberato Ferrara

#### External Tutor: Ricardo Pieralisi

## <u>Key words</u>: pervious concrete, thermal property, thermal conductivity, heat island, compaction.

In a city, mostly surfaces exposed to solar incidence are urban pavements and the facades and roofs of buildings. These elements, after receiving the above said radiation, generate heat, which increases the environmental temperature, giving rise to a phenomenon known as heat island. Because of the increased heat production, the comfortableness for the citizens' decrease and increases the energy costs associated with cooling of buildings.

Clearly, this problem occurs because of the material properties of the coatings used. In a modern city, the materials mostly present are asphalt and concrete. Therefore, one way of mitigating the formation of heat islands is to implement materials having a higher thermal inertia and not producing such significant increases in environment temperature. An example of material that fulfil these requirements without compromising costs is the pervious concrete.

The present study aims to extend the existing knowledge in the literature about the pervious concrete regarding its thermal properties and how these are affected by variations in the composition of the mixtures and the compaction process used to produce the material. For this material, we have developed an integrated model divided into two modules. The first module simulates the compaction process and the formation of the internal structure of the material. The second one focuses on the evaluation of the thermal properties of the matrix after the compaction obtained from the first module. Since other authors have already studied the basic phenomena involved in the properties of pervious concrete, the analyses of this study are done from a numerical point of view.

The realized study shows that through the application of the model, the thermal behavior of the material can be predicted. With that in mind, it has been performed a parametric study to evaluate the influence of the composition, the fineness and the degree of compaction in the thermal properties. Additionally, the study has investigated the relationship between the heat flow direction and the direction of compaction.

On this basis, through linear regression were obtained simplified equations for predicting the behavior of the material. These equations can serve as tools easy to apply for mix design and the processes required to obtain a pervious concrete with desired thermal properties.

#### MODELO INTEGRADO PARA LA EVALUACIÓN DE LA COMPACTACIÓN EN LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE HORMIGONES POROSOS

Autor: Marco Binfarè

#### Tutor: Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro / Liberato Ferrara

#### Tutor Externo: Ricardo Pieralisi

## <u>Palabras clave</u>: hormigón poroso, propiedades térmicas, conductividad térmica, islas de calor, compactación.

En una ciudad, las superficies mayormente expuestas a la incidencia solar son los pavimentos del tejido urbano, las fachadas y los techos de los edificios. Estos elementos, al recibir la radiación solar se calientan y generan un aumento de la temperatura ambiental, dando lugar a un fenómeno conocido como isla de calor. A causa del aumento de la temperatura ambiente, se reduce el confort de los ciudadanos y se aumenta el gasto energético relacionado con la refrigeración de los edificios.

Es evidente que esa problemática se debe a raíz de las propiedades de los materiales de revestimientos empleados. En una ciudad moderna, los materiales mayoritarios son el asfalto y el hormigón. Una de las maneras de evitar la formación de islas de calor, es emplear materiales que presenten una mayor inercia térmica y que no produzcan aumentos tan significativos en la temperatura ambiental. Un ejemplo de material que atiende a estos requisitos sin comprometer costes económicos es el hormigón poroso.

El presente estudio tiene el objetivo de ampliar el conocimiento existente en la literatura sobre el hormigón poroso respecto a sus propiedades térmicas y cómo estas se ven afectadas por las variaciones en la composición de las mezclas y en el proceso de compactación empleado para producir dicho material. Para ello se ha desarrollado un modelo integrado dividido en dos módulos. El primero de ellos simula el proceso de compactación y la formación de la estructura interna del material. El segundo de ellos, se centra en la evaluación de las propiedades térmicas de la matriz producida tras la compactación obtenida a partir del primer módulo. Este análisis se realiza desde el punto de vista numérico, ya que los fenómenos básicos que intervienen en las propiedades del hormigón poroso ya han sido estudiadas anteriormente por otros autores.

El estudio realizado muestra que a través de la aplicación del modelo se puede prever el comportamiento térmico del material. Teniendo esto en cuenta, se ha llevado a cabo un estudio paramétrico con el fin de evaluar la influencia de la composición, la granulometría y el grado de compactación en las propiedades térmicas. Además se ha estudiado la relación entre la dirección del flujo de calor y el sentido de compactación.

Basándose en esas consideraciones, se han obtenido por regresión lineal ecuaciones simplificadas para la previsión del comportamiento del material. Esas ecuaciones pueden servir como herramientas de fácil aplicación para el diseño de mezclas y de los procesos requeridos para obtener un hormigón poroso con las propiedades térmicas deseadas.

#### MODELLO INTEGRATO PER LA VALUTAZIONE DELLE PROPRIETÀ TERMICHE DEL CALCESTRUZZO POROSO IN FUNZIONE DEL GRADO DI COMPATTAZIONE.

Autore: Marco Binfarè

Tutor: Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro / Liberato Ferrara

Tutor Esterno: Ricardo Pieralisi

## <u>Parole chiave</u>: Calcestruzzo poroso, proprietà termiche, conduttività termica, isole di calore, compattazione.

In una città moderna, le superfici maggiormente esposte ai raggi solari sono le pavimentazioni del tessuto urbano, le facciate e i tetti degli edifici. Questi elementi, al ricevere la radiazione solare, si riscaldano generando un aumento della temperatura ambiente dando così luogo a un fenomeno conosciuto con il nome isola di calore. A causa dell'aumento della temperatura ambiente, si osserva la riduzione del benessere dei cittadini e un aumento dell'uso di energia per la refrigerazione degli edifici.

È evidente che la causa di questa problematica è da ricercarsi nelle proprietà dei materiali utilizzati per i diversi rivestimenti. In una città moderna, i materiali maggiormente impiegati sono l'asfalto e il calcestruzzo. Una delle possibili soluzioni per evitare la formazione delle isole di calore, è per tanto impiegare materiali che presentino una maggior inerzia termica e che non producano aumenti significativi della temperatura ambiente. Un esempio di materiale che permette di soddisfare tutti questi requisiti senza rappresentare costi economici maggiori è il calcestruzzo poroso.

Il presente studio ha l'obiettivo di ampliare gli studi esistenti in letteratura circa il calcestruzzo poroso rispetto alle sue proprietà termiche e come queste si vedono influenzate dalle variazioni nella composizione dell'impasto e dal processo di compattazione utilizzato per confezionare questo materiale. Con questo scopo, si è sviluppato un modello integrato diviso in due moduli. Il primo simula il processo di compattazione e di formazione della struttura interna del materiale. Il secondo modulo, si focalizza nel calcolo delle proprietà termiche della matrice ottenuta dopo la compattazione effettuata nel primo modulo. Visto che i fenomeni basici che intervengono nelle diverse proprietà del calcestruzzo poroso sono già stati studiati precedentemente da altri autori, questa analisi è stata realizzata dal punto di vista numerico, visto.

Lo studio realizzato dimostra che attraverso l'applicazione del modello sviluppato, è possibile prevedere il comportamento termico del materiale. È stato quindi possibile effettuare uno studio parametrico in modo da valutare l'influenza della composizione, della granulometria e del grado di compattazione nelle proprietà termiche del materiale. Inoltre si ha studiato la relazione tra la direzione del flusso di calore e il verso della compattazione.

Basandosi su queste considerazioni, si sono ottenute, per regressione lineare, equazioni semplificate capaci di prevedere il comportamento del materiale. Queste equazioni possono essere uno strumento di facile applicazione per la determinazione del mix design ottimale e dei processi necessari per ottenere un calcestruzzo poroso con le proprietà termiche desiderate.

### ESTRATTO ELABORATO IN ITALIANO

MODELLO INTEGRATO PER LA VALUTAZIONE DELLE PROPRIETÀ TERMICHE DEL CALCESTRUZZO POROSO IN FUNZIONE DEL GRADO DI COMPATTAZIONE.

Autore: Marco Binfarè

Relatore: Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro / Liberato Ferrara

Tutor Esterno: Ricardo Pieralisi

<u>Parole chiave</u>: Calcestruzzo poroso, proprietà termiche, conducibilità termica, isole di calore, compattazione.

Il tema specifico affrontato in questo lavoro di tesi si inquadra nell'ambito delle problematiche di efficienza energetica che il mondo edilizio sta affrontando. Questo lavoro di tesi è stato redatto in collaborazione con l'Universidad Politecnica de Cataluña in Spagna.

Questo lavoro fa parte di una ricerca condotta dal dipartimento di Ingegneria delle costruzioni dell'università spagnola con lo scopo di individuare la miglior composizione della mescola per il calcestruzzo poroso, con riferimento alle prestazioni tecnologiche. Il calcestruzzo poroso è un materiale ampliamente utilizzato e studiato per l'esecuzione di pavimentazioni permeabili, ma con questo lavoro di ricerca, si è valutato la possibilità di ottimizzare le sue prestazioni e i suoi impieghi con riferimento alle esigenze di miglioramento delle prestazioni energetiche.

In una città moderna, le superfici maggiormente esposte ai raggi solari sono le pavimentazioni del tessuto urbano, le facciate e i tetti degli edifici. Questi elementi, al ricevere la radiazione solare, si riscaldano generando un aumento della temperatura ambientale dando così luogo a un fenomeno conosciuto con il nome isola di calore [1]. A causa dell'aumento della temperatura ambientale, si osserva la riduzione del benessere dei cittadini e un aumento dell'uso di energia per la refrigerazione degli edifici.

È evidente che la causa di questa problematica è da ricercarsi nelle proprietà dei materiali utilizzati per i diversi rivestimenti. In una città moderna, i materiali maggiormente impiegati sono l'asfalto e il calcestruzzo. Una delle possibili soluzioni per evitare la formazione delle isole di calore, è pertanto impiegare materiali che presentino una maggior inerzia termica e che non producano aumenti significativi della temperatura ambientale. Un esempio di materiale che permette di soddisfare tutti questi requisiti è il calcestruzzo poroso.



**Figura 1**: Phoenix, Arizona, differenza di temperatura tra una pavimentazione tradizionale e le persone.

Come si può vedere in figura 1, le zone che irraggiano maggiormente il calore, sono quelle con la presenza di asfalto e calcestruzzo, queste zone possono raggiungere temperature tra i 48°C e i 67°C [2]. Infatti il calore emanato dalle persone è di gran lunga inferiore al calore emanato dalla pavimentazione in calcestruzzo. È quindi molto importante trovare una soluzione a questo problema in quanto, nelle città moderne, la maggior parte della superficie è ricoperta da materiali che non sono in grado di assorbire il calore proveniente dal sole, anzi, ne amplificano l'effetto.



Figura 2: esempio di isola di calore urbana.

In figura 2, viene presentata una tipica configurazione di un'isola di calore in una città moderna. Come si può notare dall'immagine, il calore si concentra nella zona più densamente abitata, questo perché si ha una maggior concentrazione di materiali che assorbono velocemente il calore e lo ritrasmettono nell'ambiente circostante generano un aumento della temperatura ambientale. Infatti, nelle zone periferiche, si nota una diminuzione della temperatura contestualmente all'aumentare delle zone verdi, zone capaci di assorbire il calore senza però ritrasmetterlo nella stessa maniera nell'ambiente.
Lo studio è partito con una revisione bibliografica, seppure esigua, in quanto in letteratura non sono presenti molti studi che trattano l'impiego del calcestruzzo poroso come materiale con una bassa inerzia termica, trattandosi appunto di una nuova applicazione. Infatti questo materiale è sempre stato utilizzato nella pratica comune per l'esecuzione di pavimentazioni con lo scopo di drenare l'acqua. Questo materiale trova le sue prime applicazioni quindi nella costruzione di strade con il fine di ridurre il fenomeno di "aqua-planing" che si manifesta in presenza di acqua sul manto stradale [3].

Nella revisione bibliografica eseguita, sono stati evidenziati anche i principali modelli di studio per il trasporto di calore nei materiali, in particolar modo si è analizzato il modello suggerito da Tavman per materiali porosi [4]. Inoltre è stato presentato uno studio che mette in relazione i diversi modelli di calcolo per il trasporto di calore [5]. Partendo dallo studio dei modelli già maturati in studi precedenti, è stato possibile, con il team di ricerca dell'Universidad Politecnica de Cataluña, sviluppare un modello integrato per la valutazione delle proprietà del calcestruzzo poroso in relazione al grado di compattazione dello stesso.

Il calcestruzzo poroso, come detto in precedenza, è un materiale poroso composto da inerti, cemento e acqua. La particolarità di questo materiale è che non contiene inerti di piccole dimensioni, sì che è possibile creare vuoti tra gli inerti di dimensioni maggiori. Questa particolarità, permette al calcestruzzo poroso di avere una porosità molto elevata e di permettere il passaggio dell'acqua attraverso la sua matrice. Normalmente la porosità di questo materiale può variare dal 15% al 35% permettendo di avere pori connessi [3].

Fino ad ora, il calcestruzzo poroso, è stato sempre utilizzato per la costruzione di pavimenti senza quindi considerare le sue proprietà come materiale con una elevata inerzia termica. Infatti questo materiale è in grado di assorbire una elevata quantità di radiazione solare e di rilasciarla poi nell'ambiente circostante i un intervallo di tempo più elevato rispetto ad un calcestruzzo tradizionale. Per ottenere un materiale con buone proprietà termiche, è quindi necessario utilizzare materie prime con determinate caratteristiche.

Fino ad ora, per il confezionamento del calcestruzzo poroso, non si aveva la necessità di scegliere le materie prime in base al loro comportamento termico, bensì venivano scelte in base alle caratteristiche meccaniche. Per le nuove applicazioni, sono state scelte le materie prime in modo tale che rispondano alle nuove esigenze. In tabella 1 si mostrano i materiali utilizzati per le simulazioni con le rispettive proprietà (UNI-10351).

	Densità (ρ) [kg/m³]	Calore specifico (C <sub>esp</sub> ) [J/kg K]	Conducibilità termica (λ <sub>e</sub> ) [W/m K]
Inerti	2500,00	908,00	2,500
Cemento	1800,00	736,00	0,955
Aria	1,225	1006,00	0,025

Tabella 1: proprietà dei materiali utilizzati per la creazione dei modelli.

Va comunque osservato che la resistenza a compressione del calcestruzzo poroso e generalmente non elevata, infatti questo materiale non è adatto a svolgere funzioni strutturali [6]. La resistenza a compressione dipende strettamente dalla percentuale di porosità del materiale: con l'aumentare del contenuto di aria nel materiale, la resistenza a compressione diminuisce e viceversa [7] [8].

Si intuisce dunque come il grado di compattazione, con la porosità, sia legato in maniera inversa. Esso rappresenta una variabile che pertanto può "controllare" e "governare" le proprietà sia meccaniche che termiche del calcestruzzo poroso. Ad un più elevato grado di compattazione corrisponde una minore porosità e dunque migliori proprietà meccaniche da un lato ma anche, dall'altro, peggiori proprietà termiche; e viceversa.

Nello studio bibliografico, sono stati poi ricercati i diversi studi riguardanti i modelli di trasporto del calore nei materiali porosi. Specificatamente al fenomeno di trasporto di calore nel calcestruzzo poroso, si è fatto riferimento al modello presentato da Tavman [4] (figura 3), il quale prevede tre differenti percorsi per il flusso di calore. Inizialmente si può fare una semplificazione considerando che il materiale possa trasportare il flusso di calore mediante due differenti configurazioni, in serie e in parallelo. In figura 3 sono evidenziati i due possibili comportamenti appena descritti.



**Figura 3:** Approssimazione del comportamento termico di un materiale poroso in serie o in parallelo.

È facile però intuire che la figura 3 rappresenta i due comportamenti estremi del calcestruzzo poroso: infatti, data la completa aleatorietà della struttura del calcestruzzo poroso, non si avrà mai un comportamento totalmente in parallelo o in serie degli elementi che compongono la mescola. Per poter quindi considerare un comportamento che più si avvicini alla realtà, bisogna far riferimento alla configurazione in figura 4 [9].



Figura 4: Traiettorie per il trasferimento del calore nel singolo elemento di calcestruzzo poroso.

Come si può vedere dalla figura 4, esistono diversi cammini per il flusso di calore nel calcestruzzo poroso. Trattandosi di un materiale eterogeneo, le proprietà dei materiali che lo compongono sono differenti tra di loro e quindi anche la loro risposta al passaggio del calore. Infatti, il materiale inerte, avendo una conducibilità termica molto più elevata rispetto a quello dell'aria, permetterà al calore di passare più facilmente.

Per descrivere il complesso comportamento del calcestruzzo poroso è stato quindi necessario ampliare i pochi studi presenti in letteratura e, partendo da questi, creare un nuovo algoritmo per la generazione del modello generale. Lo scopo principale di questo studio è pertanto formulare un modello che renda possibile valutare le proprietà termiche del calcestruzzo poroso e come queste sono influenzate dalle variazioni nella composizione dell'impasto e dal processo di compattazione utilizzato per confezionare questo materiale. Con questo scopo, si è sviluppato un modello integrato.

### Semplificazione degli elementi

Prima di descrivere il modello utilizzato, è opportuno accennare come sono stati "descritti" gli elementi costituenti il calcestruzzo poroso. In figura 5, viene presentato il modello di elemento utilizzato nelle simulazioni.



Figura 5: rappresentazione schematica dell'elemento studiato.

L'elemento base è quindi composto da un inerte sferico indeformabile circondato dalla pasta di cemento. Lo spessore che ricopre l'inerte è considerato deformabile se entra in contatto con un altro elemento. Questa semplificazione permette di simulare l'interazione reale che si ha durante il confezionamento del calcestruzzo poroso. In figura 6, vengono presentati i diversi contatti che si possono generare.



**Figura 6**: tipi di relazione tra gli elementi: nessun contatto (a), contatto tra la pasta di cemento (b), sovrapposizione della pasta di cemento (c), contatto tra gli inerti (d).

È importante che il modello possa descrivere i diversi tipi di contatto tra gli elementi perché da questo dipenderanno anche le diverse proprietà che si calcoleranno. Infatti, quando si ha un contatto diretto tra gli inerti, si osserverà un maggiore flusso di calore passante. Caso contrario, è quando si ha il contatto solo tra la pasta di cemento, che permetterà un passaggio minore di calore.

## Modello per la compattazione

Il modello sviluppato è stato diviso in due moduli. Il primo simula il processo di compattazione e di formazione della struttura interna del materiale. Il secondo modulo, si focalizza sul calcolo delle proprietà termiche della matrice ottenuta dopo la compattazione effettuata nel primo modulo. Visto che i fenomeni che governano le diverse proprietà fondamentali del calcestruzzo poroso sono già stati studiati precedentemente da altri autori, questa analisi è stata realizzata dal punto di vista numerico. In figura 7 viene presentata la filosofia con la quale lavora il modello sviluppato presso l'Universidad Politecnica de Cataluña.



Figura 7: Filosofia del modello utilizzato.

Come si può vedere dalla figura 7, i dati di entrata per il modello sono la quantità di pasta di cemento utilizzata, che determina lo spessore medio della pasta attorno all'inerte, e il tipo di curva granulometrica utilizzata. Il primo modulo del modello descrive la caduta casuale degli elementi e il loro posizionamento casuale all'interno del modello (figura 8). Il secondo modulo, riguarda invece il grado di compattazione, riorganizza gli elementi in base a uno spostamento imposto.



**Figura 8:** sequenza per il completamento del primo modulo, (a) primo passo, (b) secondo passo, (c) terzo passo.

La figura 8, rappresenta le sequenze di completamento del primo modulo. Lo scopo di questa sequenza è quello di trovare una posizione stabile per tutti gli elementi che compongono il modello. Il modulo inizia con la caduta da una posizione x casuale dell'elemento, dopodiché si ha l'identificazione del primo contatto con gli altri elementi stabili del modello ed infine si ha la rototraslazione dell'elemento fino a quando non si trova in una situazione di equilibrio stabile.

Quando viene raggiunta questa posizione, l'algoritmo sviluppato permette la deformazione della regione di contatto. Come visto precedentemente, gli elementi sono completamente circondati dalla pasta di cemento, la quale, a contatto con un altro elemento, è libera di deformarsi. La sovrapposizione di due elementi è consentita dall'algoritmo solo nel caso di interazione dell'area occupata dalla pasta di cemento. L'algoritmo, impedisce quindi la sovrapposizione degli inerti in quanto non possibile fisicamente.

Una volta creato il modello con la caduta casuale degli elementi, interviene il secondo modulo con lo scopo di simulare la compattazione. Attraverso un processo di triangolazione, si individua la posizione di ogni elemento e l'interazione con gli elementi confinanti. In questa maniera è possibile determinare il tipo di contatto tra le diverse particelle in modo da capire in quale direzione l'elemento può traslare. La compattazione avviene imponendo uno spostamento alla parte superiore del modello generato dal primo modulo. In figura 9 viene mostrato un esempio di diversi gradi di compattazione per lo stesso modello.



**Figura 9:** Applicazione dell'algoritmo per un modello, si mostrano i diversi gradi di compattazione per lo stesso: (a) 5% di compattazione, (b) 10%, (c) 15%, (d) 20%.

Il grado di compattazione viene espresso in valore percentuale. Questo valore rappresenta la variazione dell'altezza del modello che viene ridefinita a seguito all'azione di compattazione. Inizialmente, tutti i modelli presentano un'altezza definita ed un livello di compattazione pari allo 0%, applicando uno spostamento verticale della superficie superiore, si diminuisce l'altezza del modello provocando l'effetto di compattazione voluto.

Una volta terminato il processo di compattazione, vengono eseguite delle verifiche sul modello appena generato. In questa fase si verifica che non ci siano sovrapposizioni tra gli inerti e che i vari elementi rispettino i vincoli al contorno rappresentati dalle pareti del modello. Terminata anche questa fase, il modello generato e verificato è pronto per l'analisi delle proprietà di densità, calore specifico, conducibilità termica e diffusività termica.

#### **Modello termico**

Definito il modello, è possibile calcolarne le proprietà termiche utilizzando il software Ansys® [10]. Per l'utilizzo di questo software è pero necessaria la creazione di una maglia in grado di descrivere il modello appena realizzato. In questo lavoro di tesi è stato utilizzato il modello rappresentato in figura 10 che prende il nome di PLANE-55 [11].



Figura 10: elemento PLANE-55.

Attraverso l'utilizzo di questo elemento è possibile individuare spazialmente la posizione di un elemento e allo stesso momento determinare di che tipo di materiale si tratta. Il software analizza lo scambio termico per conduzione e per convezione secondo le leggi fisiche convenzionali. I dati di uscita permetteranno poi di calcolare le proprietà di densità, calore specifico, conducibilità termica e diffusività termica.

### Creazione dei modelli per le simulazioni

Una volta spiegata la filosofia con cui si lavorerà, è necessario spiegare con quali criteri sono stati generati i diversi modelli. Nella pratica reale, il calcestruzzo poroso, viene confezionato con inerti di dimensioni diverse. Per tenere in conto questo aspetto, è stata simulata una curva granulometrica con due diverse dimensioni. Un tipo di inerte di dimensioni 4mm e uno più piccolo con dimensioni di 1 mm.

Inoltre, per poter studiare come variano le proprietà termiche in funzione della curva granulometrica utilizzata, sono state simulate undici curve granulometriche con diverse concentrazioni. La tabella 2, mostra con quali criteri sono state generate le diverse curve granulometriche.

Curva	Dimensioni degli inerti [mm]		
	%ΦGrande (4 mm)	% Φ Piccolo (1 mm)	
R-1	100,0	0,0	
R-2	90,0	10,0	
R-3	80,0	20,0	
<b>R-4</b>	70,0	30,0	
R-5	60,0	40,0	
R-6	50,0	50,0	
R-7	40,0	60,0	
<b>R-8</b>	30,0	70,0	
R-9	20,0	80,0	
R-10	10,0	90,0	
<b>R-11</b>	0,0	100,0	

**Tabella 2:** contenuto in percentuale dei diversi inerti per ogni curva granulometrica.

Per poter descrivere il comportamento del calcestruzzo poroso è inoltre necessario simulare la compattazione. Per questo studio sono stati simulati 5 diversi gradi di compattazione pari al 5%, 10%, 15%, 20% e in alcuni casi è stato possibile raggiungere il 25%. Inoltre per ottenere un numero adatto ad un'analisi teorica, per ogni curva granulometrica sono stati generati 20 diversi modelli, in modo da avere un numero elevato di simulazioni. Sono stati simulati in totale circa 1100 diversi modelli. Per tenere poi in conto della anisotropia del materiale, gli stessi, sono stati analizzati nelle due direzioni principali, X e Y, generando un volume di analisi pari a 2200 modelli.

Tutti i modelli generati sono stati analizzati con lo scopo di calcolare le proprietà principali del calcestruzzo poroso, tra le quali la sua densità, il suo calore specifico, la sua conducibilità termica e la sua diffusività termica. La densità dei diversi modelli viene semplicemente calcolata a partire dal contenuto in percentuale delle diverse materie prime nel modello considerato e dalle loro caratteristiche fisiche. Le equazioni che permettono di calcolare la densità ( $\rho$ ) dei modelli sono riportate in seguito (equazioni 1-5).

$$S_{modello} = b * a \qquad [m^2] \quad (1)$$

$$\%_{inerti} = \frac{A_{inerti}}{b * a} * 100$$
[%] (2)

$$\%_{cemento} = \frac{A_{cemento}}{b * a} * 100$$
[%] (3)

$$\%_{aria} = 100 - \%_{inerti} - \%_{cemento}$$
 [%] (4)

$$\rho_{tot} = (\%_{inerti} * \rho_{inerti}) + (\%_{cemento} * \rho_{cemento}) + (\%_{aria} * \rho_{aria}) \qquad [kg/m^3] \quad (5)$$

Per quanto riguarda il calcolo del calore specifico ( $C_{tot}$ ) è necessario calcolare la massa di ogni componente. Esso infatti misura la quantità di calore che è necessaria per unità di massa per aumentare di un grado Celsius la temperatura del materiale. Questa proprietà è facilmente determinabile attraverso le seguenti equazioni (da 6 a 10).

$$m_{inerti} = \rho_{inerti} * \mathscr{Y}_{inerti} * S_{modello}$$
 [kg] (6)

$$m_{cemento} = \rho_{cemento} * \mathscr{G}_{cemento} * S_{modello}$$
 [kg] (7)

$$m_{aria} = \rho_{aria} * \mathscr{G}_{aria} * \mathcal{G}_{modello}$$
 [kg] (8)

$$m_{tot} = m_{inerti} + m_{cemento} + m_{aria}$$
 [kg] (9)

$$C_{tot} = \frac{(m_{inerti} * C_{esp-inerti}) + (m_{cemento} - C_{esp-cemento}) + (m_{aria} * C_{esp-aria})}{m_{tot}} \quad [kg/m^3] \quad (10)$$

Dopo aver calcolato le proprietà fondamentali, è stato possibile calcolare attraverso l'utilizzo del software la conducibilità termica ( $\lambda_e$ ) del calcestruzzo poroso. La conducibilità termica è la proprietà fisica di qualsiasi materiale che misura la capacità di condurre il calore. In generale, materiali molto compatti hanno valori di conducibilità termica elevati, il che significa che sono pessimi materiali isolanti. Al contrario, materiali porosi, possono raggiungere buone prestazioni termiche, ed è per questo che il calcestruzzo poroso è di particolare interesse.

Per calcolare la conducibilità termica nelle due direzioni principali (X e Y), sono state impostate nel software le condizioni al contorno presentate in figura 11. La linea rossa indica una temperatura di 20°C, mentre la linea blu indica una temperatura di 0°C. ogni modello è stato analizzato con queste condizioni al contorno, ottenendo dal software dati di uscita che hanno permesso di calcolare la conducibilità termica. Nel caso (a) si considera la direzione Y, mentre nel caso (b) si considera la direzione la direzione X.



Figura 11: condizioni al contorno applicate ai modelli generati precedentemente.

Dal software, infatti, si ottiene il flusso termico in ogni nodo generato nel processo di costruzione della maglia precedentemente descritto. Si è quindi calcolato il flusso termico totale (Q) come la sommatoria dei flussi termici nella direzione considerata.

Per poter determinare la conducibilità termica, oltre al flusso di calore presente, è necessario sapere le dimensioni del modello nella direzione considerata e la variazione di temperatura tra le due superfici estreme, nel caso studiato, l'intervallo termico è  $\Delta T=20$ °C. Con questi dati è possibile, tramite le equazioni seguenti (da 11 a 13) calcolare la conducibilità termica dei modelli generati.

$$Q = \sum_{i=1}^{n} q_i$$
 [W/m<sup>2</sup>] (11)

$$\dot{q} = \frac{Q}{n^{\circ} \, di \, nodi} \qquad \qquad [W/m^2] \qquad (12)$$

$$\lambda_e = \dot{q} * \frac{h}{\Delta T} \qquad [W/mK] \quad (13)$$

Dove con h si indica la distanza tra le due superfici opposte nella configurazione considerata. Oltre a calcolare i valori numerici di conducibilità termica, attraverso l'utilizzo del software, è stato possibile determinare l'andamento delle temperature all'interno dei modelli. Infatti, è possibile ricavare immagini che descrivono il comportamento termico del modello a seconda delle diverse condizioni al contorno applicate. In figura 12 si presenta la scala di riferimento per le temperature.

Figura 12: scala di riferimento per i valori di temperatura nei modelli.

In figura 13 e 14 invece si presenta un esempio delle immagini che descrivono il comportamento dei modelli ricavate dall'analisi mediante Ansys®. In figura 13 viene evidenziato il comportamento del modello di fronte al salto termico imposto e come le temperature variano all'interno dello stesso. Viene mostrato solo il caso di una compattazione pari al 5% con flusso di calore nelle due direzioni principali. Per maggiori risultati e immagini si può consultare il capitolo 5 della versione estesa della tesi.



Direzione Y - Compattazione 5%



Direzione X - Compattazione 5%

Figura 13: andamento tipico delle temperature nei modelli analizzati.

L'andamento della temperatura presentato, assieme alla modellazione del flusso termico del materiale illustrato in figura 14, permette di descrivere il comportamento generale del calcestruzzo poroso.





Direzione Y - Compattazione 5%Direzione X - Compattazione 5%Figura 14: rappresentazione del flusso di calore dovuto al salto termico imposto.

Consentendo di avere un quadro generale del comportamento del materiale e di calcolare in modo specifico le diverse proprietà. Dalla figura 14 si evince che la maggior parte della trasmissione del calore si verifica in corrispondenza dei punti di contatto tra gli inerti. Questo ci permette di dire che più il materiale presenta spazi vuoti e più potrà raggiungere migliori prestazioni.

Come ultima si è calcolata la diffusività termica ( $\alpha$ ). Essa viene misurata in mm<sup>2</sup>/s ed è una proprietà specifica di ogni materiale per descrivere la conduzione di calore in condizioni non stazionarie. Essa è un requisito fondamentale per risolvere l'equazione di Fourier in condizioni non stazionarie.

La diffusività termica esprime la velocità con la quale varia la temperatura all'interno del materiale a causa di una variazione di temperatura nella superficie del materiale considerato. Essa viene calcolata mediante l'equazione 14. Come si nota dall'equazione, essa dipende dalla conducibilità termica, dalla densità e dal calore specifico del materiale.

$$\alpha = \frac{\lambda_e}{\rho * C_{tot}} \qquad [mm^2/s] \qquad (14)$$

In questo estratto in lingua italiana non vengono presentati tutti i risultati ottenuti per ragioni spazio. Per maggiore chiarezza e per la consultazione di tutti i risultati ottenuti si può consultare il capitolo 5 dell'elaborato. Visto il notevole numero di dati, è stato necessario effettuare un'analisi statistica per poter eliminare i valori cosiddetti "outliers", valori che sono affetti da errori non accettabili e che comprometterebbero la bontà dello studio.

In ogni caso si è dimostrato che attraverso l'applicazione del modello sviluppato, è possibile prevedere il comportamento termico del materiale. È stato quindi possibile, con il modello creato, effettuare uno studio parametrico in modo da valutare l'influenza della composizione, della granulometria e del grado di compattazione nelle proprietà termiche del materiale. Inoltre si è studiata la relazione tra la direzione del flusso di calore e il verso della compattazione.

Basandosi su queste considerazioni, si sono ottenute, per regressione lineare, equazioni semplificate capaci di prevedere il comportamento del materiale. Queste equazioni possono essere uno strumento di facile applicazione per la determinazione del mix design ottimale e dei processi necessari per ottenere un calcestruzzo poroso con le proprietà termiche desiderate.

### <u>Conclusioni</u>

#### <u>Densità</u>

Per quanto riguarda la densità ( $\rho$ ), misurata in kg/m<sup>3</sup>, si deve evidenziare che i valori ottenuti hanno un livello di approssimazione ottimo, fatto confermato dai valori di deviazione standard presentati nel capitolo 6. La densità, non dipende dalla direzione del flusso termico.

In figura 15 è illustrato l'andamento della densità in funzione della compattazione, che conferma le ovvie e facilmente intuibili dipendenze. È altresì interamente chiaro come tali dipendenze non siano influenzate dalle diverse curve granulometriche.





La figura 15 evidenzia due aspetti molto importanti del calcestruzzo poroso. In primo luogo si può notare che non si ha una relazione importante tra il tipo di curva granulometrica utilizzata e il valore di densità. In secondo luogo si può dire che la densità è principalmente influenzata dal livello di compattazione del modello, di fatto si può dire che è l'unico parametro che influenza in modo significativo il suo andamento. Esso è descritto dall'equazione 15, con la quale si può facilmente determinare il valore di densità y conoscendo il grado di compattazione e viceversa.

$$y = 20,027x + 1472,9$$
 [kg/m<sup>3</sup>] (15)

## Calore specifico

Anche il calore specifico, come la densità, è una proprietà isotropica del calcestruzzo poroso. Come nel caso precedente, si sono ottenuti valori con un livello di approssimazione ottimo, il che ha permesso di descrivere il comportamento del calore specifico attraverso la figura 16. Anche essa non dipende dal tipo di curva granulometrica che si simula.





Inoltre è possibile dire che la variazione del valore di calore specifico con il cambiamento del grado di compattazione è molto limitata. Questo ci permette di concludere dicendo che il calore specifico può essere considerato quasi costante e può esser descritto dall'equazione 16, dove y rappresenta la proprietà in esame e x il livello di compattazione.

$$y = 872,85 - 0,0011x$$
 [J/kgK] (16)

### Conducibilità termica

Per quanto riguarda la Conducibilità termica, si deve evidenziare che non si tratta di una proprietà isotropica e che quindi bisogna differenziare le conclusioni in base alla direzione del flusso di calore. In figura 17 si può vedere il comportamento della conducibilità termica nel calcestruzzo poroso quando il flusso di calore è in direzione parallelo al verso di compattazione (y).



**Figura 17:** retta di tendenza generale per quanto riguarda la conducibilità termica (λe) del calcestruzzo poroso con flusso di calore in direzione Y.

In questo caso, si può notare che si ha una maggiore dipendenza per quanto riguarda la diversa curva granulometrica, infatti si può notare una dispersione maggiore nei punti del grafico. Lo studio ha infatti evidenziato che la curva granulometrica 3 (80% inerti di 4mm e 20% inerti di 1mm) è in grado di raggiungere migliori risultati, mentre la curva granulometrica 7 (40% inerti di 4 mm e 60% inerti di 1mm) raggiunge proprietà termiche peggiori. Si può dire inoltre che la conducibilità termica dipende strettamente dal grado di compattazione. Dopo lo studio effettuato è possibile descrivere il comportamento della conducibilità termica nel caso in cui il flusso di calore sia nella stessa direzione della compattazione con l'equazione 17.

$$y = 0.0179x + 0.5578$$
 [W/mK] (17)



Quando invece il flusso di calore è trasversale rispetto al verso di compattazione, si ottiene un andamento del tipo rappresentato in figura 18.

**Figura 18:** retta di tendenza generale per quanto riguarda la conducibilità termica (λe) del calcestruzzo poroso con flusso di calore in direzione X.

Anche in questo caso, si può notare che si ha una maggiore dipendenza per quanto riguarda la diversa curva granulometrica, infatti si può notare una dispersione maggiore nei punti del grafico. Lo studio ha infatti evidenziato che la curva granulometrica 3 (80% inerti di 4mm e 20% inerti di 1mm) è in grado di raggiungere migliori risultati, mentre la curva granulometrica 7 (40% inerti di 4 mm e 60% inerti di 1mm) raggiunge proprietà peggiori. Si può dire inoltre che la conducibilità termica dipende strettamente dal grado di compattazione. Dopo lo studio effettuato è possibile descrivere il comportamento della conducibilità termica nel caso in cui il flusso di calore sia nella stessa direzione della compattazione con l'equazione 18.

$$y = 0.0278x + 0.4465$$
 [W/mK] (18)

In figura 19, vengono messi in relazione i due comportamenti appena descritti. Questi grafici evidenziano un fatto molto importante e cioè il fatto che si possono raggiungere migliori prestazioni quando il flusso di calore è trasversale rispetto al verso di compattazione. Questo implica che nelle applicazioni pratiche, sarebbe meglio scegliere la soluzione nella quale verso di compattazione e verso del flusso di calore sono discordi. Queste equazioni inoltre permettono di avere uno strumento di facile impiego per la determinazione della conducibilità termica di calcestruzzi porosi.



Figura 19: relazione tra le rette tendenza in funzione della direzione del flusso di calore.

Il comportamento descritto in figura 19 è principalmente dovuto al fatto che durante le diverse fasi di compattazione del modello si vanno a modificare i contatti tra gli elementi. Essendo che la caduta casuale degli elementi avviene in direzione Y, in questa fase, si vengono a creare contatti che vengono modificati in maniera minore rispetto ai contatti che si generano perpendicolarmente al senso di compattazione.

Con l'aumentare della compattazione, aumentano le interazioni e le superfici di contatto in direzione X, il che provoca la differenza di inclinazione delle rette di tendenza osservata in figura 19. Questo ci permette di dire altresì che fino ad un grado di compattazione di circa il 10% si ottengono migliori prestazioni in direzione perpendicolare al senso di compattazione, superato questo limite, la situazione si inverte.

## <u>Diffusività termica</u>

Nel caso della proprietà di diffusività termica ( $\alpha$ ), si è registrata una maggiore incertezza nei dati raccolti. Questo è dovuto principalmente al fatto che si tratta di una proprietà che dipende da tutte le proprietà calcolate in precedenza, il che amplifica gli errori. Come nel caso della conducibilità termica, anche la diffusività è una proprietà anisotropa per il calcestruzzo poroso.

In figura 20 viene presentato il caso in cui il flusso di calore è concorde con il verso di compattazione del modello. In questo caso si può notare una dipendenza con il tipo di curva granulometrica più marcata ed inoltre i dati ottenuti confermano come migliore curva granulometrica la numero 3 (80% inerti di 4mm e 20% inerti di 1mm), mentre come peggiore la numero 7 (40% inerti di 4 mm e 60% inerti di 1mm).





Dal grafico si nota in primo luogo che si ha una maggiore incertezza nella determinazione della retta di tendenza dovuta ai motivi precedentemente descritti. Inoltre si evidenzia che la diffusività termica presenta principalmente una dipendenza con il livello di compattazione. Questa relazione è descritta dall'equazione 19.

$$y = 0.0057x + 0.4458$$
 [mm<sup>2</sup>/s] (19)

Alla stessa maniera, viene presentato in figura 21 il comportamento della diffusività termica nel caso in cui il verso di compattazione sia trasversale al flusso di calore. In questo caso si ha una dispersione minore rispetto al caso presentato in figura 20, ma l'andamento di questa proprietà è sempre influenzato principalmente dal livello di compattazione.



**Figura 21:** retta di tendenza generale per quanto riguarda la diffusività termica (α) del calcestruzzo poroso con flusso di calore in direzione X.

Il comportamento può esser descritto per l'equazione 20. Anche per quanto riguarda la diffusività termica, si piò dire che in entrambe le configurazioni, la curva granulometrica che ha raggiunto prestazioni migliori è la curva 3 (80% inerti di 4mm e 20% inerti di 1mm), mentre quella che ha raggiunto le prestazioni più basse è la curva 7 (40% inerti di 4 mm e 60% inerti di 1mm).

$$y = 0.012x + 0.3735 \qquad [mm^2/s] (20)$$

Il comportamento descritto in figura 22, come nel caso presentato precedentemente, è principalmente dovuto al fatto che durante le diverse fasi di compattazione del modello si vanno a modificare i contatti tra gli elementi. Essendo che la caduta casuale degli elementi avviene in direzione Y, in questa fase, si vengono a creare interazioni che vengono modificate in maniera minore rispetto ai contatti che si generano perpendicolarmente al senso di compattazione.



Figura 22: relazione tra le rette tendenza in funzione della direzione del flusso di calore.

Con l'aumentare della compattazione, aumentano le interazioni e le superfici di contatto in direzione X, il che provoca la differenza di inclinazione delle rette di tendenza osservata in figura 19. Questo ci permette di dire altresì che fino ad un grado di compattazione di circa il 10% si ottengono migliori prestazioni in direzione perpendicolare al senso di compattazione, superato questo limite, la situazione si inverte.

### Conclusioni generali

Il lavoro di tesi ha presentato un grande sforzo in termini di modellazione durante i primi quattro mesi, nei quali sono stati generati in un primo momento i codici che sono serviti in un secondo momento per la realizzazione dei modelli necessari per le analisi. Dopo questa fase iniziale, i modelli generati, sono stati analizzati e sono state calcolate le diverse proprietà fondamentali del calcestruzzo poroso utili per questo lavoro di tesi.

Le analisi svolte, hanno innanzitutto evidenziato la possibilità attraverso i dati raccolti, di impiegare il calcestruzzo poroso come un materiale in grado di risolvere, almeno in parte, i problemi legati alla formazione delle isole di calore. Questo studio ha evidenziato inoltre i due principali fattori che più influenzano le prestazioni termiche del calcestruzzo poroso. Essi sono il grado di compattazione e il tipo di curva granulometrica utilizzata nel modello.

Per quanto riguarda il tipo di curva granulometrica, lo studio ha evidenziato che per ottenere migliori prestazioni è necessario prevedere soluzioni con un elevato contenuto di aria al loro interno. I risultati ottenuti evidenziano che una mescola costituita dall'80% di inerti di 4mm e il 20% di inerti da 1mm, permette di raggiungere valori di conducibilità e diffusività termica minori rispetto ad una mescola formata dal 40% di inerti di 4mm e 60% di inerti di 1mm.

Il parametro che più influenza il comportamento del calcestruzzo poroso è pero il suo livello di compattazione. Lo studio ha evidenziato infatti che una maggiore o minore compattazione influenza direttamente le prestazioni del materiale. Aumentando il livello di compattazione, si è notato un aumento dei contatti tra i diversi elementi costituenti, il che provoca un maggior scambio termico per conduzione e quindi un peggioramento del comportamento termico del materiale.

In tutti i casi in cui il grado di compattazione è minore al 10%, si è osservato che nella configurazione in cui il flusso di calore è perpendicolare rispetto al verso di compattazione, si ottengono valori di conducibilità e diffusività termica minori se rapportati agli stessi modelli ma con flusso di calore parallelo al senso di compattazione. Infatti, quando il flusso di calore e il verso di compattazione sono concordi, si ha notato un aumento nei valori di conducibilità e diffusività termica. Nel caso in cui il grado di compattazione è maggiore al 10%, la situazione si inverte.

Al termine dello studio si sono dunque ottenute delle semplici equazioni che forniscono l'andamento delle proprietà termofisiche del calcestruzzo poroso in funzione della curva granulometrica impiegata e dal grado di compattazione. Queste equazioni possono costituire un utile e pratico strumento a disposizione del progettista per la scelta della miscela al fine di ottenere le prestazioni desiderate.

## <u>Studi futuri</u>

Il lavoro di tesi svolto, rappresenta solamente un punto di inizio dal quale ampliare le conoscenze riguardo il calcestruzzo poroso. Infatti questo elaborato raccoglie le poche informazioni disponibili in letteratura e propone un primo studio sulla possibilità di impiegare il calcestruzzo poroso come un materiale isolante. Infine, ritengo di particolare interesse i seguenti punti come tematiche per futuri studi

- Studio rispetto alla trasmissione di calore attraverso convezione all'interno del materiale, che influenza ha questo fenomeno nel suo comportamento globale;
- Impiego del calcestruzzo poroso in edifici e non solo come materiale per la costruzione di pavimentazioni. Per esempio, si potrebbe utilizzare il calcestruzzo poroso in pannelli prefabbricati, nelle facciate degli edifici, capaci di assorbire la radiazione solare;
- Studio circa la posizione migliore per questi pannelli, per esempio, a contatto con l'ambiente esterno o in una posizione intermedia nella parete

# CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

## **1.1 Antecedentes**

Hoy en día las ciudades están aumentando de tamaño así como del número de habitantes, provocando un incremento del suelo urbano formado principalmente de materiales como el asfalto y por tanto con menos espacios verdes. El aumento de la población y el empleo de pavimentos asfálticos contribuyen al aumento del calor en las zonas urbanas. Este fenómeno se llama "isla de calor urbana" y se debe principalmente al hecho que en las ciudades modernas se utilizan siempre más materiales que absorben el calor o que lo reflecten aumentando la temperatura en las zonas más populosas.

En la actualidad, uno de los principales problemas el tipo de material a utilizar en las ciudades, porqué esto puede determinar o no la formación de la isla de calor urbana. Por eso se está intentando caracterizar nuevos materiales que permitan disminuir el problema del aumento del calor debido a los tipos de materiales utilizados. El material mayoritario en una ciudad moderna es el hormigón, empleado para el diseño de los pavimentos y para la construcción de casas. Dentro de los diferentes hormigones que han sido desarrollados en el curso de los años, es de particular interés en este estudio el hormigón poroso, porqué ocupa una gran porción de superficie en las ciudades modernas.

El hormigón poroso se forma utilizando áridos de diferente tamaños, sin áridos finos, recubiertos con un volumen de cemento específico y luego formado/vertido en un molde. Después de la dosificación el hormigón poroso presenta sus huecos interconectados, permitiendo la penetración de agua y de aire. El hormigón poroso hasta la actualidad ha sido utilizado principalmente como material para el diseño de pavimentos de carreteras, desde hace poco tiempo se está desarrollando la idea que el hormigón poroso se podría utilizar también como material capaz de disminuir el efecto de las islas de calor. Además, gracias a la conformación de ese material, se podría pensar en la recuperación del calor a través de la porosidad que presenta.

## 1.2 Objetivo

### 1.2.1 Objetivo general

El objetivo principal que se ha enmarcado en este Trabajo Final de Carrera, de acuerdo con las problemáticas actuales, es el estudio del comportamiento térmico del hormigón poroso. Asimismo y muy relacionado a este objetivo, se quiere estudiar cuáles son los parámetros físicos que más influyen en las propiedades térmicas del hormigón poroso (por simplicidad de escritura, HoPo).

Además se quiere establecer un método para medir el valor de las diferentes propiedades térmicas para un material heterogéneo como es el HoPo. Con este propósito, se estudiarán las soluciones propuestas en estudios previos y se presentará un nuevo algoritmo para la creación de modelos de HoPo. El propósito de calcular las diferentes propiedades del HoPo es determinar los datos que permitan diseñar mezclas para solucionar el problema de las islas de calor urbanas.

## 1.2.2 Objetivo específicos

En primer lugar, el estudio se enfocará en la presentación del algoritmo utilizado para la creación de los modelos de HoPo. La utilización de este algoritmo, permitirá simular un número elevado de modelos que servirán para la determinación de las diferentes propiedades del HoPo. Además, esto permitirá simular la aleatoriedad de la distribución de las partículas en los diferentes modelos.

Con el fin de simular una situación cercana a la realidad, se utilizaran diferentes curvas granulométricas con dos diferentes tamaños de áridos, uno grande y uno pequeño. Se simulará la variación en porcentaje de los dos tamaños con el propósito de destacar las diferencias en los valores de las diferentes propiedades. Además, simulando las diferentes curvas granulométricas, será posible determinar la curva granulométrica que permita alcanzar mejores propiedades térmicas.

Especificadamente, con el propósito de describir el comportamiento térmico del HoPo, se analizaran las propiedades más importantes, es decir su densidad ( $\rho$ ), su calor especifico (C<sub>t</sub>), su conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) y su difusividad térmica ( $\alpha$ ). El objetivo principal es calcular la conductividad térmica efectiva de ese material y sus relaciones con los otros parámetros físicos, de manera que pueda ser utilizado en diferentes campos aprovechando también el hecho que se trata de un material bastante barato.

## 1.3 Metodología

Se empezará con el estudio bibliográfico del tema a continuación se describirá el algoritmo utilizado para simular los modelos de hormigón poroso. Se hará una descripción general del material y se muestrearán los materiales que componen la mezcla del HoPo. Luego, se analizaran los principales estudios sobre el transporte de calor en el HoPo con particular atención a los diferentes modelos desarrollados en el pasado.

En el segundo capítulo se hará una breve revisión histórica con el intento de encontrar las aplicaciones anteriores del hormigón poroso, luego se hablará sobre los componentes de este material y de sus propiedades y de cómo los materiales que se emplean pueden influir el comportamiento del mismo. Además se presentarán estudios sobre materiales heterogéneos con el propósito de entender diferentes metodologías para la determinación de los parámetros térmicos de estos materiales.

En el tercer capítulo se analizará el algoritmo desarrollado en la tesis doctoral de Ricardo Pieralisi por la Universidad Politécnica de Cataluña, se utilizará para la creación de los modelos bidimensionales que se utilizará en los siguientes capítulos para caracterizar el comportamiento de este material. Este algoritmo tendrá la tarea de producir un modelo simplificado para describir el hormigón poroso, y también se relacionará el modelo generado con el grado de compactación del mismo.

En el cuarto capítulo se describirá el modelo térmico que se utilizará para de calcular los valores de las propiedades del HoPo. Los análisis térmicos han sidas calculados a través de Ansys®, con el fin de entender mejor los cálculos hechos, en este capítulo se explicará como el programa analiza y calcula los diferentes parámetros térmicos para los diferentes modelos generados anteriormente.

En el quinto capítulo se presentarán primero las ecuaciones que permiten calcular las diferentes propiedades objetivos de este trabajo. Posteriormente se presentaran los resultados obtenidos de los análisis de los modelos generados anteriormente. En particular, se presentarán los valores obtenidos de densidad ( $\rho$ ), calor especifico (C<sub>t</sub>), conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) y de difusividad térmica ( $\alpha$ ).

En el sexto capítulo se analizarán los resultados presentados en capítulo quinto. Primero, se presentaran las consideraciones hecha con el fine de depurar los resultados obtenidos de los "outliers". Posteriormente, se hará un análisis estadístico para cada propiedad del HoPo presentada en los capítulos anteriores. Finalmente se describirá el procedimiento para obtener la recta tendencia de los modelos simulados con el fin de obtener una clara visión del comportamiento del HoPo al variar la curva granulométrica y el grado de compactación.

En el séptimo se presentarán las conclusiones derivadas de los diferentes análisis realizados. Asimismo se presentarán una serie de futuras líneas de investigación con el fin de una mayor obtención de información de cara a ampliar el estudio hecho.

# CAPÍTULO 2

# ESTADO DEL ARTE

## 2.1 Introducción

En el primer capítulo se han presentado los objetivos de esta tesis y la metodología para obtenerlos. El presente capítulo se centra en una amplia revisión bibliográfica del hormigón poroso (HoPo), en particular en los aspectos más relevantes que influyen en sus propiedades térmicas. Primero se presentarán las propiedades generales del HoPo, pasando a una revisión histórica a través del análisis de artículos científicos. Tras la cual, se llevará a cabo una descripción de los principales materiales que forman el HoPo, fabricación, ejecución y sus principales usos.

# 2.2 Hormigón poroso

De acuerdo con las filosofías de diseño de hormigones más tradicionales, el HoPo se obtiene mediante la reducción del contenido de finos en la dosificación y ha sido empleado desde hace tiempo en diferentes campos, siendo su principal uso en la construcción de pavimentos sometidos a bajas cargas. El HoPo por su conformación, como se presentará en el apartado 2.2.1, permite el paso de la lluvia por su interior, disminuyendo el riesgo de inundaciones y optimizando la capacidad de drenaje. La superficie del hormigón poroso, además, es bastante irregular, característica que permite al material obtener un nivel de atrito mayor respecto al del pavimento asfaltico.

El inicio de su aplicación data del año 1852, en la construcción de dos viviendas en Inglaterra. En los años 40 su utilización se popularizó y empleándose en la construcción de viviendas en el mismo país. Entre los años 45 y 50 comenzaron las primeras aplicaciones y experimentos con pavimento poroso. Estos experimentos tenían como base conseguir una estructura densa de agregados conectados por una baja cantidad de mortero o pasta, demostrando la buena permeabilidad del HoPo como una nueva propiedad de estudio y análisis [3]. Pero los estudios no recibieron bastante impulso hasta comienzo de los años '70, cuando las empresas constructores de autopistas con peaje así como algunos municipios recurrieron a los pavimentos porosos para solucionar algunos problemas e inconvenientes. Uno de los principales problemas eran los accidentes debido a la presencia de agua sobre la superficie de la carretera. Tanto la elevada porosidad conectada del HoPo como el coste económico proporcionaron una solución a estos inconvenientes aumentando la permeabilidad de las carreteras [12].

## 2.2.1 Aspectos generales del hormigón poroso

Debido a su elevada porosidad conectada el HoPo permite la filtración del agua a través de su espesor. Para lograr una estructura de poros interconectados, HoPo utiliza una composición granulométrica específica: sin la fracción fina y con una cantidad mínima de pasta de cemento produciendo un contacto cohesivo entre los granos. Además, la energía de compactación también afecta la capacidad de drenaje del material (fig. 2.1).



Figura 2.1: infiltración de agua en hormigón poroso.

El contenido de vacíos puede variar entre el 15 % y el 35 % [3], permitiendo, como se ha descrito anteriormente, una composición de poros interconectados. El volumen, tamaño y distribución de los mismos influye en la velocidad con que el agua, u otros líquidos o gases, pasan por el interior del material.

Hasta ahora se han presentado los principales empleos que el HoPo tuvo en los últimos 50 años, pero el objetivo de este trabajo es ampliar el conocimiento sobre este material como aislante térmico, es decir, un material que responda a las nuevas exigencias en la edificación. Un problema actual es la reducción de los consumos energéticos en las casas, pero la solución no es tan sencilla como puede parecer.

De hecho los problemas más relevantes se han encontrado en las casas que están ya construidas y, por lo tanto, la resolución de problemas energéticos significa un esfuerzo

económico importante. La misión de este trabajo es por lo tanto implantación de este material, ya utilizado para otras finalidades, con respecto a las nuevas exigencias. En particular se analizará las características del diseño, tamaño de los áridos, espacio entre los mismos, porcentaje de permeabilidad, compactación y disposición de los huecos que afectan las prestaciones térmicas.

Se puede decir que todas las etapas, desde la selección de los materiales hasta las secuencias de construcción de este tipo de hormigón influyen sobre sus características. Por ejemplo la cantidad de pasta de cemento es muy importante, de hecho, tiene que recubrir todas las partículas de agregado grueso y formar puentes de adherencia entro los áridos, pero el mortero no debe rellenar los vacíos que hay entre los áridos, si no el hormigón pierde la permeabilidad. Además se puede decir que sobre el diseño de las mezclas, influyen determinadas variables como, la relación agua/cemento, el porcentaje de los vacíos, granulometría de los áridos, el proceso de curado y el uso de aditivos químicos y minerales.

La característica principal del HoPo, como se ha dicho anteriormente, y que lo hace diferente de otro tipo de hormigón, es su alto grado de porosidad. Generalmente esto tipo de hormigón se ejecuta suprimiendo los áridos finos provocando la formación de vacíos entre el agregado grueso. El agregado grueso se selecciona de manera que el tamaño de las partículas sea constante. Esta característica permite crear una estructura, con el porcentaje de vacíos necesario y suficiente para la fabricación del hormigón con un alto contenido en poros.

Si por un lado el HoPo puede tener propiedades óptimas para el aislamiento térmico y acústico, por otro, tiene una muy baja resistencia a la compresión, no pudiendo alcanzar una elevada resistencia a la misma como otros hormigones por su elevado porcentaje de poros. Como se puede ver en la figura 2.2, la relación agua/cemento, afecta directamente al porcentaje de poros y por tanto a su resistencia [13].



**Figura 2.2:** Probetas cilíndricas elaboradas con hormigón de alta permeabilidad para evidenciar la elevada presencia de vacíos en la mezcla.

Como se ha destacado anteriormente, una de las principales características que afecta el comportamiento térmico del hormigón es la cantidad de poros contenidos en la mezcla. El hormigón, siendo un material compuesto de materiales granulares no puede presentar una compacidad total. Esta imposibilidad es debida al hecho que hay siempre una inclusión de aire entre los áridos, y, además no se puede alcanzar una compacidad total por la ausencia de finos que podrían rellenar todos los vacíos. La inclusión de aire o agua en al hormigón es intrínseca, sus poros o huecos pueden estar más o menos llenos de agua o aire, pero, por muy compactado que esté, siempre será posible la observación de poros.

### Porosidad

La porosidad es la característica principal de este hormigón. De hecho la permeabilidad alcanzada en esta mezcla se debe principalmente a la presencia de aire en el interior de la estructura. El contenido de aire en un HoPo está entre el 15% y el 30% [14]. Además se puede decir que la permeabilidad depende cómo los poros están conectados entre sí. En el HoPo hay tres diferentes tipos de poros: poros en la pasta de cemento, huecos en los agregados y huecos de aire. En figura 2.3 se muestran los diferentes tipos de huecos que se pueden encontrar en el HoPo.



Figura 2.3: diferentes tipos de poros en el hormigón poroso [14].

Los poros más pequeños que se pueden encontrar en la mezcla de HoPo son los poros en la pasta de cemento. En el interior de la pasta de cemento hay dos tipos de poros, poros en el gel y poros capilares. Los primeros presentan una estructura más pequeña que los poros capilares. El contenido de aire en la pasta de cemento depende de la relación agua/cemento y de la duración del curado. Esos tipos de poros pueden ser conectados o desconectado.

Los huecos generados entre los agregados son los responsables de la permeabilidad del HoPo. Esos pueden ser conectados o aislados, los poros que presentan una conexión, permiten la evacuación del agua. La forma y el tamaño de los huecos dependen principalmente de la forma de los agregados y del grado de compactación del ensayo.

Se puede resumir los diferentes tipos de poros que se pueden encontrar en el HoPo en la tabla 2.1

Denominaciones	Radios en µm
Poros en el gel	50 - 150
Poros capilares	1,5 – 15
Poros pequeños entre los áridos	10 - 1000
Poros grandes entre los áridos	> 1000

Tabla 2.1: Tamaños de los poros en el hormigón poroso.

## Características térmicas

Las características térmicas del HoPo dependen de las propiedades de los materiales utilizados en su mezcla y de su estructura granular (relacionado con la compacidad de los áridos, la cantidad de pasta y el nivel de compactación aplicada). El empleo de materiales con conductividad térmica muy baja, independientemente de la configuración del modelo, permitirá alcanzar propiedades de aislamiento más elevadas. Normalmente en el diseño del hormigón no se consideran las propiedades térmicas de los componentes, porqué su empleo en la construcción está más relacionado con sus propiedades mecánicas.

Se entiende por conductividad térmica la mayor o menor facilidad para conducir el calor, está influenciada básicamente por la porosidad. El valor de conductividad térmica del aire es 0,025 W/mK [9], un valor muy bajo si se compara con los otros materiales que forman el hormigón, así un mayor contenido de aire corresponde a una mejor capacidad de aislamiento.

Los valores de la conductividad térmica están ampliamente tabulados pero dichos datos deben ser considerados con las reservas lógicas dado que se han obtenido por métodos experimentales y existe una amplia dispersión de características físicas entre materiales semejantes. Incluso para materiales idénticos se pueden medir diferentes conductividades en función de su humedad, de la temperatura de ensayo y de la dirección del flujo de calor (materiales anisótropos como la madera), por lo que los valores propuestos se suelen referir a materiales secos a 20°C.

La conductividad térmica del hormigón está influida fundamentalmente por las características mineralógicas del árido, dependiendo también de la dosificación, la densidad, la humedad y la temperatura del hormigón. La densidad aparente es un parámetro fundamental para diferenciar la conductividad de familias de materiales muy diferentes, como los hormigones, áridos y aislantes. Existe una ley general que relaciona bajas conductividades con bajas densidades, porque la ligereza del material suele estar producida por huecos en su interior ocupados por aire, que es mucho más aislante que el material compacto. Un hormigón convencional, de acuerdo con NBE-CT-79, tiene una conductividad media de 1,63 W/mK.

La capacidad térmica C<sub>t</sub> [J/m<sup>3</sup>K] de los materiales de la construcción tiene una gran influencia en los procesos de transmisión de calor. Esto determina el fenómeno de la inercia térmica definida por el retardo y amortiguación de la onda de calor, así favoreciendo la estabilidad térmica del ambiente interior de los edificios. En hormigones convencionales, de acuerdo con NBE-CT-79, se puede asumir como valor medio de calor especifico 2,52 J/m<sup>3</sup>K.

El calor específico Ce [J/KgK] es uno de los dos factores que determinan la capacidad térmica de un material. Su magnitud, entre la mayoría de los materiales constructivos, suele oscilar muy poco, con valores en el rango de 800 a 1200 [J/KgK] para los materiales pétreos y entre 900 y 1500 [J/KgK] para los materiales orgánicos, destacando como excepcionalmente alto el calor específico del agua con un valor de 4184 [J/Kg K]. Ello implica que el calor específico de un material puede aumentar bastante si contiene una elevada proporción de agua en su masa, como ocurre con el terreno natural o los cerramientos húmedos. Para hormigones convencionales, de acuerdo con NBE-CT-79, se puede asumir como valor medio de calor específico 1050 J/KgK.

La densidad D [Kg/m<sup>3</sup>] de los materiales para la construcción presentan valores muy dispares, como por ejemplo 2750 [Kg/m<sup>3</sup>] para las rocas compactas y 25 [Kg/m<sup>3</sup>] para los materiales aislantes como la fibra de vidrio [15]. Además la densidad es el factor determinante del valor de la capacidad térmica de los materiales. Los valores de las densidades de los materiales constructivos habituales están perfectamente tabulados, para un hormigón convencional, de acuerdo con NBE-CT-79, se puede asumir un valor de 2400 kg/m<sup>3</sup> como media [16].

Los valores de conductividad térmica de cada material no se ven afectados por el grado de compactación, se debe precisar que esta no afecta las propiedades térmicas si no cambia la estructura interna de los materiales. En general, las propiedades térmicas del HoPo cambiaran si sube el grado de compactación porque se quita el aire del ensayo, esto significa dejar una masa más densa.

Además, el grado de compactación, afectará a las propiedades del modelo porqué a diferentes grados de compactación corresponden diferentes números y tipos de contactos entre los materiales. Con un nivel de compactación elevado, se obtendrá una masa más compacta y con más contactos entre los agregados y por lo tanto todas las propiedades térmicas se verán afectadas.

### Resistencia a compresión

Como en la mayoría de los materiales porosos, la resistencia a la compresión del HoPo es afectada por la porosidad de su estructura interna. El comportamiento mecánico de los materiales depende principalmente de la estructura interna y, la presencia de poros afecta de manera importante a sus propiedades mecánicas. Como se ha dicho anteriormente, el principal uso del HoPo como pavimento de carreteras se debe a sus propiedades de filtración del agua, pero es importante también que sea capaz de soportar el peso de los vehículos.

Por esa razón se han hecho diferentes estudios sobre la relación entre el contenido de poros en el HoPo y la resistencia a la compresión del mismo. El estudio por D. S. Ghafoori [6] destacó que la estructura porosa de los materiales porosos puede ser caracterizada por un gran número de parámetros como por ejemplo el tamaño de los poros, la conectividad entre los mismos, la rugosidad de las caras de los agregados y, por tanto, de la cantidad de poros. Además se ha destacado que en los materiales porosos, la resistencia mecánica del material, se ve afectada por muchos parámetros, pero son todos irrelevantes si se comparan con la porosidad.

De acuerdo con [7], la mayoría de los poros en un HoPo es debida a los huecos que quedan entre los áridos gruesos. Por lo tanto, la resistencia a compresión del HoPo es afectada por el volumen global de los huecos [8]. Con el fin de estudiar la variación en el comportamiento mecánico del HoPo con la variación de la porosidad, en el estudio [6], se han preparados diferentes ensayos con diferentes porcentajes de porosidad. Una vez preparados los ensayos, se ha evaluado la resistencia a compresión después de 28 días. Los resultados del estudio [6] son presentados en figura 2.4.





La figura 2.4 muestra los resultados experimentales del estudio por D. S. Ghafoori [6] sobre el HoPo y además propone modelos de referencia utilizados, es decir el modelo exponencial y logarítmico. Como se puede observar, los resultados experimentales tienen un comportamiento parecido a los modelos teóricos. Por tanto se puede decir que la porosidad, como se ha descrito anteriormente, afecta de una manera importante a las propiedades mecánicas del HoPo. De hecho con un porcentaje de porosidad del 20% se obtienen unos niveles aceptables de resistencia a la compresión, pero a medida que sube el contenido de huecos en el HoPo, disminuye de manera muy rápida la resistencia a la compresión del mismo.

### Efectos de la compactación

La compactación del hormigón es un proceso mediante el cual se disminuye el contenido de aire, quedando una masa más compacta. Por lo tanto el resultado de la compactación será una probeta con el mismo contenido de materiales pero con menor aire en el interior. Normalmente la compactación del HoPo se hace mediante una carga puesta sobre la carga del hormigón, aumentando el valor de carga, se aumentará el grado de compactación.

En el HoPo la compactación afecta mucho a su permeabilidad y a su resistencia. Un hormigón con un elevado contenido de aire, es decir con un bajo nivel de compactación, tendrá en el interior un elevado contenido de aire, lo que permitirá un paso más fácil del agua y de contaminantes, disminuyendo la vida útil del hormigón, al revés, un hormigón con un elevado grado de compactación, permitirá menos poros y menos probabilidades de infiltraciones.

Como se puede imaginar, un grado de compactación elevado, permite a la mezcla alcanzar un nivel de resistencia a compresión más elevado, pero no así valores de porosidad altos, por tanto, un grado de compactación bajo permite alcanzar valores elevados de porosidad, pero la resistencia a la compresión baja.

El grado de compactación afecta también las propiedades térmicas, como fue comentado anteriormente, con un nivel alto de compactación se formarán más contactos, obteniendo de esa manera un cambio térmico a través de una conducción más elevada. Además, a un nivel mayor de compactación, le corresponde un ensayo con una masa más densa, este hecho permite al calor pasar de una manera más sencilla, haciendo que la probeta pierda sus propiedades térmicas.

El grado de compactación afecta de una manera significativa a todas las propiedades del HoPo, este trabajo se centrará especialmente en como los diferentes grados de compactación afectan a las propiedades térmicas de los ensayos. Se debe destacar que hasta ahora ningún estudio ha descrito como el grado de compactación puede determinar diferentes valores de conductividad en este material, porque hasta la actualidad se ha empleado solo como material para pavimentos.
Como se presentará posteriormente, en los modelos se definirán diferentes niveles de compactación, de hecho se analizarán modelos con un grado de compactación del 5% al 25% con intervalos de 5%. Como se puede imaginar, un nivel de compactación nulo o muy bajo (0-5%) permitirá alcanzar valores de conductividad térmica y de capacidad térmica inferiores a los resultados que se obtendrían con un grado de compactación más elevado como por ejemplo 20-25%.

## 2.2.2 Materiales del hormigón poroso

Los materiales y proporciones a utilizar dependerán de los objetivos del diseño. En particular, en su uso como material aislante, de acuerdo con el objetivo de este trabajo de tesis, la elección de los materiales a utilizar en la mezcla deberá garantizar un buen aislamiento térmico y acústico.

Por lo tanto las elecciones de los materiales y la dosificación de este hormigón son fundamentales en las prestaciones del HoPo así como la granulometría de los áridos, el porcentaje agua/cemento, la compactación, el espacio entre los áridos y la disposición de los vacíos. En los apartados siguientes se presentarán los materiales que lo forman y como estos influyen en las propiedades térmicas del HoPo.

#### Cemento, adiciones y aditivos

En el HoPo, como en los hormigones convencionales, el material básico que lo constituye es el cemento, el cual va a formar la pasta necesaria para obtener la correcta consistencia de la mezcla. También se pueden añadir, adiciones y aditivos con el objetivo de alcanzar una mayor porosidad de la mezcla. En general, las diferentes proporciones de estos materiales en el diseño del HoPo afectarán a sus propiedades. De acuerdo con la literatura, se puede asumir como valor medio de conductividad térmica para el cemento portland un valor de 0,80 W/m K [17].

Los niveles de resistencia y porosidad adecuados para el HoPo, se pueden lograr con relaciones agua/cemento entre 0,27 y 0,30 [18]. Estas relaciones son bajas y generan mezclas con poca trabajabilidad. El principal inconveniente de aumentar las relaciones agua/cemento, en un material tan poroso como el HoPo, es que la pasta puede deslizarse por gravedad a través de los conductos internos hacia el fondo del molde, obstruyendo los poros e impidiendo así el paso del aire. Si esto ocurre, pueden obtenerse valores de resistencia a la compresión aceptables pero se obtienen porosidades diferentes por capas diferentes [19].

En el diseño del HoPo, como en el caso del hormigón convencional, se pueden añadir a la mezcla adiciones para modificar favorablemente alguna de sus propiedades o conseguir ciertas características especiales tales como aislamiento térmico, acústico o una determinada coloración. Las adiciones más comunes son por ejemplo las escorias, cenizas volantes, polvos minerales, materiales inertes (como los colorantes y los materiales no minerales) y de naturaleza orgánica (ciertas resinas sintéticas).

Los aditivos minerales finamente divididos, por ejemplo, se añaden al hormigón para aumentar el volumen de la pasta o para compensar la mala graduación de los agregados. Se pueden clasificar como químicamente inactivos (inertes), puzolánicos o cementosos. Los materiales puzolánicos y cementosos pueden contribuir al desarrollo de la resistencia en el hormigón y, como consecuencia, suelen requerir menos cemento para producir una resistencia dada. Cuando los minerales finalmente divididos se añaden a hormigones con un bajo contenido de finos, como el HoPo, la trabajabilidad mejora y aumenta la resistencia, pero disminuye el grado de permeabilidad para la cual el hormigón ha sido diseñado [20].

Otro tipo de adición que se puede hacer es la puzolana. La puzolana es un material silíceo que, por sí mismo, posee poco o ningún valor cementoso pero, en la forma finamente dividida y en presencia de humedad reacciona con el hidróxido de calcio, a las temperaturas ordinarias, para formar compuestos que poseen propiedades cementosas.

Las puzolanas de uso más común son la ceniza volante o el humo silíceo. En el hormigón las puzolanas producirán el mismo efecto físico que los materiales finamente divididos, sin embargo, las puzolanas son químicamente reactivas y por lo tanto se obtienen beneficios adicionales. Además de permitir alcanzar una mejor trabajabilidad, permiten también reducir la generación de calor y la exudación del mismo [20]. La adición de puzolana está restringida por la EHE a un rango entre 6 y 30% del peso del cemento.

Como se ha comentado anteriormente, el uso de adiciones como sílice, fibras o cenizas volantes presenta una mejora en las características del material pero eleva los costes. Hay, por lo tanto, que evaluar la utilidad de poner adiciones en el hormigón con respecto a los costes.

#### <u>Áridos</u>

De acuerdo con las filosofías tradicionales de diseño del HoPo se utiliza solamente la fracción gruesa de los áridos. Se define árido grueso aquel que queda retenido en el tamiz N°4 (4,75 mm) y menor a 3 pulgadas (75mm) y proviene de la desintegración de las rocas; puede a su vez clasificarse en piedra chancada y grava [21]. El empleo de una cantidad mayor de árido grueso permite utilizar una cantidad menor de agua y cemento. Esto se debe al hecho que la superficie de las caras que absorben la pasta de cemento es menor. Contrariamente, si se emplean áridos de tamaño pequeño, la superficie de absorción será mucho más elevada y por lo tanto se necesitará más agua y cemento.

El árido fino, no utilizado por el diseño del HoPo, se define de acuerdo con la normativa EHE-08 como un material duro e inerte que se emplea para preparar el hormigón o mortero que pasa por un tamiz de 4,75 mm. Para la fabricación del hormigón de estructura ligera, se pueden emplear agregados de baja densidad, presentando también una resistencia limitada a la compresión.

Estos agregados son constituidos de una estructura inorgánica celular y pueden ser preparados por expansión, calcinación o fusión insipiente de productos, escorias de altos hornos, arcillas comunes, cenizas volantes y pizarras, o mediante otro tratamiento de materiales naturales, tales como piedra pómez, perlitas y escorias. Estos áridos podrían ser empleados en el diseño de mezclas de HoPo, con el fin de obtener un material más ligero sin propiedades estructurales.

Presentado anteriormente, en el HoPo no se utiliza agregado fino, pero Fernández, Vítola y Salminci [22] estudiaron el uso de un cierto porcentaje de agregado fino con respecto al agregado grueso (AF/AG). En este estudio se indica que valores entre el 5% y el 30% se recomiendan según el uso que se le quiera dar al HoPo. El límite inferior se recomienda para que la adherencia de la pasta con las partículas de agregado sea lo suficientemente fuerte como para evitar segregación y resistencias muy bajas. El límite superior se recomienda para generar resistencias mayores, pero sin llegar al punto en el que se colmaten los vacíos del material y se disminuya la porosidad del mismo. Adicionalmente, el uso de agregado más fino aumenta la trabajabilidad de las mezclas lo cual implica un beneficio en su manejo y colocación.

El árido, de acuerdo con la normativa EHE-08, para poder ser empleado en el diseño del hormigón, debe cumplir los siguientes requisitos:

- Las partículas deberán ser químicamente estables y deberán estar libres de escamas, tierra, polvo, limo, humus, incrustaciones superficiales, materia orgánica, sales u otras sustancias que puede producir daños.
- Deberá estar conformado por partículas limpias, de perfil preferentemente angular, duras, compactas, resistentes y de textura, cuando será posible, rugosa.
- La granulometría seleccionada, deberá ser de preferencia continua.

Respecto a la conductividad térmica de los áridos, se debe decir que en ésta pueden encontrar valores muy diferentes. Esta diferencia de valores se debe principalmente a la estructura de los mismos, de hecho, como se ha indicado anteriormente, la porosidad y el consiguiente contenido de aire afecta de manera relevante a las propiedades térmicas. Los valores de referencia para las rocas utilizadas en la construcción se muestran en la tabla 2.2.

2800,00	3,50
1900,00	1,50
2500,00	2,40
2700,00	3,50
3000,00	3,20
	2800,00 1900,00 2500,00 2700,00 3000,00

**Tabla 2.2:** Propiedades de las principales rocas naturales utilizadas en la construcción<br/>(normativa UNI 10351).

Como se puede apreciar en la tabla 2.2, los materiales que presentan una densidad más elevada tienen una conductividad térmica elevada. Al contrario, las rocas con una densidad menor como la piedra caliza, tienen una conductividad menor. Esto se debe al hecho que a paridad de volumen, si un material presenta una densidad mayor, significa que es un material más compacto y por lo tanto tiene un flujo de calor por conducción más elevado, debido a que hay más contactos.

Los áridos influyen de diferente manera a las propiedades del HoPo, como por ejemplo la relación árido/cemento. Una relación baja árido/cemento implica que existe un mayor porcentaje de pasta, capaz de proveer mejores enlaces entre las partículas de agregado y con ello aumentar la resistencia. Sin embargo, este aumento porcentual de pasta implica que se rellenen mayores cantidades de vacíos lo cual provocará disminuciones en la porosidad. Los estudios de Mullingan A. [19] presentan un análisis entre relaciones árido/cemento de 4/1 y 8/1, una de sus conclusiones es que la porosidad no se ve seriamente afectada por esta variable mientras la pasta no provoque obstrucciones. Sin embargo, descubrió que las relaciones árido/cemento que ofrecen resistencias óptimas para alcanzar una adecuada porosidad se encuentran entre 4/1 y 5/1 como máximo.

#### <u>Agua</u>

El agua, junto con el cemento y los áridos, es uno de los tres elementos fundamentales del HoPo. En particular, cumple dos importantes funciones en la mezcla de los hormigones porosos, en primer lugar, como en los hormigones convencionales, reacciona químicamente con el cemento para producir la parte solida de la pasta de cemento siendo esto lo que da la resistencia al hormigón y en segundo lugar da manejabilidad a la mezcla, que como se comentará posteriormente, es una de las propiedades más importantes para formar un hormigón homogéneo y bien compactado.

Poner la correcta cantidad de agua es importante para alcanzar una adecuada trabajabilidad del hormigón, es decir obtener una consistencia que nos permite manejar sin problemas la mezcla. Como se muestra en la figura 2.5, si se pone poca agua, habrá un hormigón denso y seco, difícil de compactar y de homogeneizar y que por lo tanto resultará en un hormigón débil. Por otro lado, demasiada agua, provocará una mejor trabajabilidad, al mismo tiempo, favorecerá la segregación y no se obtendrá un HoPo homogéneo, lo cual también dará como resultado un hormigón débil. Es decir, la cantidad de agua tiene un rango o un valor óptimo para evitar estar en condiciones extremas.

Normalmente las relaciones agua/cemento que se pueden utilizar por los HoPo son en el ratio de 0,29 y 0,44 [23]. En el estudio [23] se ha destacado que en las mezclas con una razón a/c entre 0,41 y 0,44 hay un escurrimiento de la pasta de cemento hacia la parte inferior de los ensayos, obteniendo en esa manera capas de diferentes propiedades en el sentido vertical. Con valores más elevados de la razón a/c se forma una capa impermeable en la parte baja de las probetas, perdiendo por lo tanto la permeabilidad de la mezcla.



(a)





**Figura 2.5:** ejemplos de hormigones porosos con diferentes relación a/c; a) demasiada poca agua, b) correcta relación agua/cemento y c) demasiada agua en el diseño.

Tal como fue presentado en el estudio [23], para el diseño del HoPo es recomendable utilizar razones a/c entre 0,35 y 0,38. Mezclas con a/c menores presentan muy baja resistencia y apreciable desprendimiento superficial de áridos. Mezclas con a/c mayores presentan escurrimiento de la pasta de cemento hasta el fondo de las probetas y una consiguiente disminución de permeabilidad.

En la práctica la relación entre el contenido de agua y la resistencia del HoPo no es tan clara como con los hormigones convencionales porqué el contenido total de la pasta es menor al contenido de vacíos entre los agregados. Por lo tanto el contenido de agua debería ser estrechamente controlado, una correcta relación agua/cemento debería dar una mezcla compacta pero no demasiada seca y tampoco debería permitir a los agregados destacarse de la forma, como se puede mirar en la figura 2.5(b).

### 2.2.3 Empleos del hormigón poroso

Del estudio de la literatura del HoPo, se destaca que el HoPo ha sido utilizado desde el principio como un material permeable que permite el paso del agua en el subsuelo. Los primeros empleos de este material, de hecho, fueron para el diseño de pavimentos en carreteras. De un lado el HoPo permitía aliviar la contaminación del sistema sanitario por las aguas de lluvia y por otro lado su empleo como pavimento permitió reducir los accidentes debidos por la presencia excesiva de agua en las carreteras.

Por lo tanto, fue posible evacuar el agua en exceso en la superficie de la carretera de manera más rápida a través de los poros que caracterizan al material. Otro empleo que se encuentra en la historia del HoPo es en la construcción de paneles prefabricados en taludes de canales.

El problema de las ciudades modernas es principalmente el calor que se desarrolla en las mismas debido al hecho que siempre hay más superficie urbana recubierta por materiales impermeables como el hormigón. Este aumento de calor concentrado en las ciudades toma el nombre de "isla de calor". Por lo tanto el calor de una ciudad está estrechamente relacionado con el grado de permeabilidad de su superficie.

Los cambios de calor que se realizan en la superficie de la tierra en zonas urbanas tienen un gran impacto en cuanto si se forma una isla de calor urbano o no. Por ejemplo, muchas ciudades tienen menos árboles que las zonas rurales circundantes. Los árboles proporcionan sombra a la tierra, evitando que la radiación del sol sea absorbida. Sin ellos, la superficie de la tierra se calentaría. Los tejados y el pavimento oscuro también absorben más radiación.

Una visión más moderna del empleo del HoPo es, por lo tanto, el control de las islas de calor en las zonas urbanas. A medida que las ciudades aumentan calles, edificaciones, industria y gente, se crean islas de calor en las zonas urbanas. Isla de calor urbana es el nombre que se usa para describir el calor característico tanto de la atmósfera como de las superficies en las ciudades (o áreas urbanas) comparadas con sus entornos no urbanizados. La isla de calor (figura 2.6) es un ejemplo de modificación climática no intencional cuando la urbanización cambia las características a la superficie y a la atmósfera de la tierra [1].

Como se puede observar de la figura 2.6, el calor es más alto en las zonas donde se encuentra una mayor concentración de superficie no permeable, como puede ser el centro de una ciudad. Este aumento de temperatura es debido principalmente a una mayor concentración de infraestructuras, las cuales no permiten al suelo absorber el calor y, además, siendo superficies poco permeables, reflejan el calor obteniendo como efecto un aumento en la temperatura.



Figura 2.6: Ejemplo de cómo varían las temperaturas en correspondencia con una isla de calor [1].

Las zonas edificadas ofrecen más superficie para la absorción del calor. Los materiales tradicionales absorben mucha energía, lo disipan en las noches y en los edificios altos los efectos son múltiples por las reflexiones horizontales de la radiación percibida que aumenta la probabilidad de que esta energía permanezca en el suelo: el efecto se conoce como efecto cañón y se produce únicamente en edificaciones de altura por la falta de grandes zonas verdes, por las calles asfaltadas y estrechas, por el entubamiento de los afluentes hídricos, y por la contaminación, entre otros factores. Todo ello genera un aumento de la temperatura que se denomina Isla de calor.

El tipo de superficie de la zona considerada, por lo tanto, es un factor importante para la formación de las islas de calor. Los materiales que componen el tejido urbano, con sus propiedades, determinan las temperaturas de las diferentes zonas. Las temperaturas son más altas en aquellas zonas con una mayor densidad de construcción, y son más bajas cerca de parques o zonas más abiertas (figura 2.6). Durante el día las superficies secas y oscuras que absorben luz solar se vuelven muy calientes, mientras que las superficies más claras y/o mojadas son mucho más frías. El sombreado de la superficie también ayuda a controlar la temperatura. Posteriormente se presentaran los factores que más influyen en la formación de las islas de calor. Los principales factores que contribuyen a la presencia e intensidad de las islas de calor son:

- Clima
- Localización geográfica
- Hora del día y estación
- Forma de la ciudad
- Funciones de la ciudad

*El clima*, en particular el viento y las nubes, influyen en la formación de islas de calor. Las magnitudes de la isla de calor son mayores bajo condiciones climáticas calmadas y claras. A medida que los vientos aumentan, mezclan el aire y reducen la isla de calor. A medida que las nubes aumentan reducen el enfriamiento nocturno por radiación, y también reducen la isla de calor. Las variaciones estacionales de los patrones climáticos afectan la frecuencia y la magnitud de la isla de calor [1].

*La localización geográfica* influye sobre el clima y la topografía de la zona, así como sobre las características de los alrededores rurales de la ciudad. Las influencias climáticas regionales o locales, tales como los sistemas locales de vientos, pueden afectar las islas de calor; por ejemplo, las ciudades costeras pueden experimentar un enfriamiento de las temperaturas urbanas durante el verano cuando las temperaturas de la superficie del océano son más frías que las de la tierra y el viento sopla hacia tierra firme.

Cuando las ciudades están rodeadas por superficies rurales mojadas, el enfriamiento más lento de estas superficies puede reducir las magnitudes de la isla de calor, especialmente en climas cálidos y húmedos [24]. Las islas de calor de ciudades localizadas en latitudes medias, generalmente son más fuertes en el verano o en el invierno. En climas tropicales, la estación seca puede favorecer grandes magnitudes de las islas de calor.

Las funciones de la ciudad regulan la emisión de contaminantes a la atmósfera urbana, el calor por uso de energía, y el uso de agua en irrigación. El calor antropogénico, o calor generado por las actividades humanas, principalmente la combustión de combustibles fósiles, puede ser importante para la formación de islas de calor [25]. El calentamiento antropogénico generalmente tiene mayor impacto durante la estación de invierno de los climas fríos, en el núcleo del centro de la ciudad. En casos determinados, ciudades construidas en forma muy densa pueden presentar calentamiento antropogénico severo durante la estación de verano, como consecuencia de un alto uso de energía para enfriar las edificaciones [26].

El factor más importante para el objetivo de este trabajo es la *forma de la ciudad,* incluye los *materiales usados* en la construcción, las características de las superficies de la ciudad, tales como las dimensiones y espacio entre las edificaciones, las propiedades térmicas, y la cantidad de espacios verdes. La formación de islas de calor es favorecida por:

• materiales de construcción relativamente densos que son lentos en calentarse y enfriarse, y almacenan una cantidad de energía

- el reemplazo de las superficies naturales por superficies impermeables o a prueba de agua, lo que induce un área urbana más seca, en donde hay menos agua disponible para la evaporación, lo cual contrarresta el calentamiento del aire
- una menor capacidad de las superficies de reverberar la radiación solar; las superficies oscuras, tales como las carreteras de asfalto, absorben más luz solar y se ponen mucho más calientes que las superficies de color claro.

La distribución de temperatura, como destacado anteriormente, está influenciada por diferentes factores, lo más importante, por el propósito de este trabajo, es el tipo de material de las superficies en las zonas urbanas. Un aspecto muy importante para el control de las islas de calor es aumentar las superficies que pueden absorber el calor, como sería normal en la naturaleza. En una ciudad moderna, la mayoría de su superficie es ocupada por carreteras, y la mayoría de esas se encuentra hechas de hormigón no permeable, que por lo tanto refleje la luz solar y el calor. Se podría disminuir este efecto con el empleo de HoPo en las ciudades que presentan la problemática de la isla de calor con el fin de absorber una mayor cantidad de calor.

Por ejemplo, fue conducido un estudio para determinar las relaciones entre las temperaturas de las diferentes zonas y los materiales con lo cual se recubrieron las carreteras en la ciudad de Santiago de Chile. El estudio [27] destacó que en las temperaturas de la ciudad no solo influye el tipo de material utilizado, sino también el uso del suelo. Sin embargo el tipo de material utilizado permanece como el principal factor por la formación de islas de calor en una ciudad.

El estudio [27], por lo tanto, indica que en el interior de la ciudad existe una variación de las temperaturas, esta variación está asociada directamente con los usos y coberturas de los suelos. En las zonas urbanas de alta densidad se observa una menor presencia de coberturas con vegetación y mayores superficies impermeabilizadas que las zonas urbanas de baja densidad. Durante la mañana, los suelos urbanos registran temperaturas más bajas que las zonas naturales, relación que se invierte en la noche.

La mayoría de los edificios en una zona urbana tienen una superficie oscura. Las superficies oscuras absorben más energía de la luz solar, es decir, este hecho provoca un aumento de la temperatura de todo el edificio. Edificios con paredes de ladrillo o techos cubiertos con materiales oscuros, se calientan muy rápidamente. En ambos casos, el calor producido en la superficie, se transmite al interior de la estructura y al aire del ambiente interno.

Como se ha descrito anteriormente, los edificios con superficies oscuras se calientan más rápidamente y, por lo tanto, necesitan ser enfriados mediante aire acondicionado, pero esta solución requiere más energía. La producción de mayor energía genera una mayor polución en la ciudad, y, además, causa un futuro calentamiento local. Esto genera un efecto en cascada y se obtiene como resultado una expansión de la isla de calor.

Como se puede ver en la figura 2.7, asfalto y hormigón, necesarios para la expansión de las ciudades, absorben una enorme cantidad de calor proveniente de la luz solar. En una

ciudad, el componente urbano de mayor exposición a la radiación solar es el pavimento, con una superficie aproximadamente de 20% del total. En la mayoría de los casos ese elemento tiene una alta absorción y una elevada capacidad térmica. Por lo tanto, la contribución de ese elemento al efecto de isla de calor urbana es significativa, en especial en climas áridos con elevados niveles de radiación [28].



**Figura 2.7:** Phoenix, Arizona, diferencia de temperatura entre un pavimento tradicional y las personas.

Como se puede ver en la figura 2.7, la temperatura de la superficie de los pavimentos tradicionales, durante el verano, tiene una temperatura elevada, es decir entre 48°C y 67°C [2]. Las temperaturas que alcanzan estos tipos de pavimentos, además de calentar el aire, pueden calentar también el agua de lluvia. Esto contribuye a aumentar el efecto de la isla de calor y a disminuir la calidad del agua. Por lo tanto se puede entender la importancia de utilizar "pavimentos fríos", es decir pavimentos que permiten de alcanzar temperaturas más bajas durante el día.

El HoPo, con su peso ligero y características de color almacena menos calor que el hormigón convencional o asfaltos. El color del pavimento de HoPo absorbe la luz y almacena menos calor de la radiación solar en comparación con los materiales más oscuros, tales como asfalto convencional, reduciendo así el efecto isla de calor. Además, los poros permiten que el agua almacenada en el suelo se evapore en un clima cálido, evitando un aumento de la temperatura. La reflexión solar, también llamado albedo, es el porcentaje de la energía solar reflejada por una superficie.

Típicamente, para hormigón se encuentra entre 35% y 40%, siendo mayor que la de asfalto (entre 5% y 10%) [1].Estos tipos de pavimentos, contienen en su interior aire, agua y vapor. Cuando estos pavimentos están húmedos por el agua de lluvia, alcanzan temperaturas más bajas a través de la refrigeración por evaporación. El agua pasa a través de los poros del material a al suelo por debajo de este. Cuando están secos, la determinación de la temperatura del HoPo puede haber una incertitud. Por ejemplo, los huecos grandes en HoPo aumentan la superficie disponible. Estas condiciones limita la transferencia de calor

entre el pavimento y el suelo. Por lo tanto, se observa un aumento de la temperatura de la superficie durante el día [2].

Por el contrario, la estructura porosa del HoPo, permite disminuir el almacenamiento de calor, debido al hecho que hay un aumento de cambios de calor por convención con el aire atmosférico. En general, se puede, pero, decir que la limitada transferencia de calor entre la capa inferior del pavimento y el suelo, reduce la liberación de calor durante las horas nocturnas. La liberación, durante la noche, del calor almacenado en materiales urbanos es un factor significativo en formación de la isla de calor. Además, se debe decir, que la conductividad térmica de los pavimentos es un parámetro que influye de manera importante en la formación de la isla de calor urbana. Es decir, pavimentos que tienen una baja conductividad térmica, se calentarán en la superficie, pero no permitirán que el calor penetre hasta el suelo. Por lo tanto, el calor no se distribuirá tan rápidamente como en pavimentos tradicionales.

# 2.3 Análisis térmico de hormigones

#### 2.3.1 Hormigón poroso

Con respecto al tema de las islas de calor tratado anteriormente, los objetivos principales de los proyectistas en el campo de la edificación son el ahorro energético con la consiguiente reducción de las emisiones de agentes contaminantes y sobre todo la sostenibilidad ambiental. Por eso se está intentando desarrollar nuevos materiales o de emplear materiales ya existentes para llevar a cabo estos objetivos.

Como se ha comentado anteriormente, el HoPo ha sido utilizado principalmente como material para pavimentos de carreteras principalmente por el drenaje del agua, pero desde hace relativamente poco tiempo se está empleando como material para bajar los efectos de las islas de calor. Además, de por la conformación porosa de este material y por su capacidad de absorber calor, se podría pensar en recuperar el calor de la radiación solar absorbida.

#### Características que influencian el comportamiento térmico

El HoPo se fabrica utilizando áridos recubiertos con un volumen de cemento específico y luego vertiéndolo en un molde. El material resultante se puede utilizar como bloques o paneles. Una vez desmoldado, el hormigón tiene un porcentaje de porosidad entre 15% y 20% y los huecos se mantienen interconectados permitiendo el paso del aire. En esta fase, los poros están conectados entre ellos formando canales que permiten que se produzca un flujo de aire significativo solamente a presiones diferenciales de 5 Pa [17]. La porosidad del hormigón permeable es de dos tipos [18]:

- Porosidad intrínseca de la pasta de cemento endurecida, por lo general en el rango de nano y micro tamaño.
- Porosidad diseñada a través el utilizo de aditivos en la escala de mm.

Los estudios del HoPo lo definen como un material trifásico. Existen el árido, los vacíos y la pasta de cemento alrededor de los áridos. Por lo tanto, siendo un material heterogéneo, la conductividad térmica efectiva ( $\lambda_e$ ) debería ser la media de los valores de conductividad térmica de sus componentes, pero el valor de la conductividad térmica efectiva depende también del efecto de convección del aire y de radiación entre las diferentes interfaces dentro del material.

Estos dos parámetros son significativos en caso en que los diámetros de los huecos sean más grandes que 1 cm y si las temperaturas están muy por encima de la temperatura ambiental. Normalmente estas dos condiciones no se presentan, por lo tanto, de acuerdo con Tavman [4], la afirmación que la radiación de calor y la convección no son significativas cuando se considera la transferencia de calor estática en HoPo es válida.

El HoPo y sus propiedades se optimizan a través de un cuidadoso control del tamaño del árido mediante el tamizado, para reducir la fracción del tamaño seleccionado. La forma y la angulosidad de los áridos afectan la cantidad de espacio disponible para el relleno del cemento. La densidad aparente (DA) de un árido se saca a través de la Eq. (2.1) y sirve para indicar la cantidad de partículas sólidas que van a rellenar el volumen del molde correctamente, y se define como:

$$DA = \frac{V}{M} \tag{2.1}$$

Donde, V es el volumen del árido y M es el volumen del molde. Los factores que influencian la densidad aparente son la forma y la angulosidad de los agregados, como se muestra en la tabla 2.3. Esa se define como el estado alcanzado del material sin compactación o vibración.

La tabla 2.3 muestra las características que pueden tener los áridos que se emplean en el diseño del HoPo. Como se puede observar, con áridos perfectamente redondos se obtiene una porosidad aparente, por el contrario, con áridos altamente angulares, la porosidad aparente baja. Esto es debido al hecho que los áridos con forma más irregulares, pueden llenar de manera mejor los vacíos, permitiendo lograr una porosidad aparente menor.

Forma de los agregados	Descripción en general	Porosidad natural	Porosidad aparente natural	
	Esférico Perfectamente redondeada	0,39-0,40	0,60-0,61	
	Irregular Ligeramente redondeada o subangulares	0,45-0,47	0,53-0,55	
	Escamoso Altamente angular Alargada	0,50-0,51	0,49-0,50	

Tabla 2.3: Forma de los áridos y sus propiedades de empaquetamiento [17].

Para medir la conductividad térmica efectiva del HoPo es importante que el material no presente agua en sus poros. Se puede definir el coeficiente de llenado como la relación volumétrica entre la matriz de cemento fresco y los huecos interconectados formados por las propiedades intrínsecas de los áridos, como por ejemplo su forma y su angulosidad.

#### Conductividad térmica por materiales porosos

El HoPo como se ha definido anteriormente, es un material heterogéneo y poroso, es decir con un elevado contenido de aire en su interior. Los materiales porosos pueden ser divididos en dos clases, los materiales con "porosidad interna" que tienen burbujas como por ejemplo esponjas. El otro tipo de material es el que presenta una "porosidad externa" como materiales formados de partículas. La predicción de la conductividad térmica en un material heterogéneo o compuesto ha sido el objetivo de diferentes estudios en la literatura clásica y se han desarrollado un gran número de modelos [29], [30].

La mayoría de los modelos desarrollados por esos estudios tienen valores empíricos al su interno. Esto es debido al hecho que fueron estudiados por determinados materiales, por lo tanto, este no permite la utilización de estos los modelos de manera genérica. Además en estos estudios se utiliza impropiamente la palabra "poros" y esto es motivo de confusión. En el estudio por C. James y K. Carson [5], se hace una diferenciación entre la porosidad interna y externa. Además el estudio se encentra en la transferencia de calor en condición de "steady-state" y por materiales que pueden ser considerados como material isotrópicos en la macro escala.

Como se ha comentado anteriormente, la conductividad de un material poroso depende de las características de las diferentes fracciones del material y de sus propiedades. En acuerdo con el estudio [5], se presentan en figura 2.8 las diferentes configuraciones que se pueden obtener en un material poroso como el HoPo.



Figura 2.8: vectores de flujo por esferas in en un medio continuo [5].

En la figura 2.8, se muestra un modelo teórico para un material poroso. En los dos casos, hay una inclusión de esferas formadas de un material diferente respecto al medio continuo. Además, en los dos casos se aplica una diferencia de temperatura entre la parte alta y la parte baja del modelo. El mismo método será utilizado posteriormente para determinar las propiedades de los ensayos de este trabajo de tesis. En el primer caso, figura 2.8 (a), la conductividad de las esferas es menor al del medio de su alrededor, y se puede observar que el flujo térmico es prevalentemente en el medio. Por el contrario, en figura 2.8 (b), las esferas tienen una conductividad mayor del medio y, por lo tanto, el flujo de calor, es prevalentemente entre las esferas.

En acuerdo con el estudio [5] y con la figura 2.8, se puede decir que el flujo de calor depende principalmente del valor de conductividad térmica del material disperso en el medio continuo. Es decir si la conductividad de la fase dispersa ( $\lambda_{disp}$ ) es menor o mayor del valor de conductividad del medio continuo ( $\lambda_{cont}$ ). Cuando  $\lambda_{cont} > \lambda_{disp}$ , el flujo térmico será esencialmente en el medio continuo. Por el contrario, cuando  $\lambda_{cont} < \lambda_{disp}$  el flujo térmico seguirá lo más posible la configuración de los elementos dispersos.

En materiales con "porosidad interna" compuesta de burbujas como por ejemplo esponjas, las partículas dispersa tendrán un valor de conductividad térmica menor del medio continuo y sus comportamientos serán como lo presentado en figura 2.8 (a). Al revés, por materiales con partículas con una conductividad mayor del medio alrededor, el comportamiento será como en figura 2.8 (b).

Como se ha indicado anteriormente, en la literatura hay diferentes interpretaciones de cómo solucionar el problema de la determinación de la conductividad en un material poroso. Por lo tanto, es necesario buscar en la literatura los principales modelos y mostrar cuales son las diferencias entre ellos. Por simplicidad se presentaran, posteriormente, de manera detallada los modelos límites y de manera genérica los modelos intermedios. Los modelos límites para determinar los valores de conductividad térmica de los materiales heterogéneos son el modelo en serie y el modelo en paralelo. Como se muestra en la figura 2.9, el modelo en serie representa el límite inferior, al revés, el modelo en paralelo representa el límite superior.



Figura 2.9: confronto entre los diferentes modelos de transferencia de calor [5].

Los otros dos modelos más importantes desarrollados para la determinación de los valores de conductividad en materiales heterogéneos fueron lo de Maxwell [31] y el modelo EMT ("Effective Medium theory") [32]. En el modelo de Maxwell se asume que las partículas no pueden ser en contacto entre ellos, y por lo tanto, no se pueden formar contactos entre las partículas cercanas. En el modelo EMT de contra, se supone que hay una distribución totalmente aleatoria de las partículas, y por lo tanto se pueden formar contactos entre las

partículas. Además, una diferencia entre los modelos de Maxwell y el modelo EMT está en las diferentes asunciones que los autores hacen en las derivaciones de las expresiones.

Además, como se puede observar en figura 2.9, se destacan dos casos del modelo de Maxwell. En el primer caso, las partículas tienen un valor de conductividad mayor del medio continuo, y por lo tanto se obtienen valores de conductividad del material heterogéneo menores comparados con el otro modelo de Maxwell. De hecho, en el segundo caso, las partículas tienen un valor de conductividad menor respecto al medio continuo, y se obtienen valores de conductividad del material más elevados. Esto es debido al hecho que la fracción del medio continuo es mayor de la fracción de las partículas, y por lo tanto es favorecida la conducción del calor.

Posteriormente se presentan los dos modelos que representan los límites superiores e inferiores del comportamiento de los materiales porosos. Sin embargo, por este trabajo de tesis se utilizará una distribución totalmente aleatoria de las partículas. Esto se debe a que en el HoPo se pueden presentar conexiones entre los huecos, y por lo tanto, las partículas con menor capacidad de conducción se pueden encontrar conectadas.

#### Modelos límites para la transferencia unidimensional del calor

De acuerdo con el estudio [17], se puede decir que la conductividad térmica del HoPo está afectada principalmente por la fracción de volumen de sus componentes, tanto por los áridos, la matriz de cemento y el medio (normalmente aire) que llena los vacíos interconectados, como por otros materiales heterogéneos. Teniendo en cuenta esta afirmación, las propiedades de conducción térmica del HoPo dependerán de sus componentes, la fracción de volumen de cada componente y como se distribuyen dentro de la estructura. Por ejemplo, como se muestra en la figura 2.10, los componentes se podrán disponer en paralelo o en serie (como aproximación general).



Figura 2.10: Material multifase con aproximación en paralelo y en serie

Como aproximación, se puede ver la analogía con la electrotécnica. Por ello se pueden escribir las siguientes ecuaciones (Eq. 2.2 y 2.3) para el cálculo de la conductividad térmica media:

$$\bar{\lambda} = \boldsymbol{\Phi}_1 * \lambda_1 + \boldsymbol{\Phi}_2 * \lambda_2 + \dots + \boldsymbol{\Phi}_n * \lambda_n$$

Paralelo:

(2.2)

$$\overline{\lambda} = \frac{\lambda_2 * \lambda_3 * \dots * \lambda_n}{\boldsymbol{\phi}_1 * \lambda_2 * \lambda_3 * \dots * \lambda_n + \boldsymbol{\phi}_2 * \lambda_1 * \lambda_3 * \dots * \lambda_n + \boldsymbol{\phi}_n * \lambda_1 * \lambda_2 * \dots * \lambda_{n-1}}$$
(2.3)

Donde  $\lambda$ i es la conductividad térmica de un material y  $\Phi$ i es la fracción de volumen del componente en particular. Es fácil entender que en la disposición en serie, el conductor pobre de los componentes domina la conducción de calor. Mientras, en el caso de una disposición en paralelo, el mejor conductor domina la conducción de calor. Por esto, la mejor disposición para la conductividad térmica del HoPo sería la configuración en serie; pero, como se puede ver en la figura 2.11, la disposición de los componentes en el HoPo es totalmente aleatoria. Esto hace que la estructura del HoPo no sea ni en serie ni en paralelo. Por eso, obtener un modelo preciso del flujo de calor a través de este tipo de estructura es muy complicado.



Figura 2.11: Estructura del hormigón poroso.

Según el estudio de Wong [17], una manera para solucionar este problema es hacer una aproximación con el fin de obtener un modelo simplificado. La simplificación adoptada en ese estudio prevé asumir los áridos de forma esférica y que esos estén recubiertos de una capa de pasta de cemento, como se muestra en la figura 2.12. Como primera aproximación, además, se puede asumir que todos los áridos son del mismo tamaño.



Figura 2.12: Idealización de la estructura física del hormigón permeable al aire en la escala milimétrica.

Haciendo la simplificación presentada en figura 2.12 se admite no tener en cuenta de las formas de los agregados. Esta consideración se puede hacer porqué el tamaño de los huecos es inferior a 1 cm de radio, y por lo tanto, como se presentó anteriormente y de acuerdo con el estudio de Tavman [4], se puede decir que la aproximación hecha no afecta al modelo con errores significativos.

Como se puede observar en la figura 2.13, en el HoPo existen dos caminos disponibles para la conducción de calor: una ruta no pasa por el material sólido y se lleva a cabo a través del aire, mientras la otra se lleva a cabo a través del material sólido. De acuerdo con los estudios sobre las propiedades térmicas de los materiales [9], se puede decir que el aire es un mal conductor de calor (0,025 W/mK a la atmosfera estándar), por eso, la mayor parte del calor se producirá a través de la fase compuesta sólida. Por lo tanto se podría ignorar razonablemente la conducción a través del aire.

Por un lado si no se considera la conducción del calor a través del aire, se obtendrán valores de conductividad más altas, por otro lado considerando también la conducción del calor a través del aire, los resultados de conductividad serán más bajos. Esto se debe a que el aire es un mal conductor de calor, permitiendo el paso del calor con más dificultad. Esta aproximación, por lo tanto, es a favor de seguridad, es decir que se obtendrán valores de conductividad más bajos respecto al comportamiento real.

Por eso, en condiciones estándar y suponiendo que los huecos no se llenan de agua (se tendrá que utilizar paneles prefabricados de HoPo donde no se puede producir infiltraciones de agua), la transferencia de calor se producirá principalmente por conducción. Es importante descartar la hipótesis de presencia de agua al interior del HoPo



porque esto produciría la presencia de un medio con una conductividad mayor respecto al aire (0,602 W/mK [9]), con la consiguiente aumento de la conductividad total del modelo.

Figura 2.13: Trayectorias de transferencia en el material.

Para medir experimentalmente la conductividad térmica del HoPo se confeccionaran algunas muestras, y a través del método del hilo caliente [33] medir las propiedades de las muestras. Para utilizar este método, se debe realizar el ensayo sobre un material aislante, del cual se conocen las propiedades térmicas. Posteriormente, se mide el cambio de temperatura en la cara más alejada de la fuente de calor después de un determinado tiempo. Así se puede obtener la conductividad térmica experimental del ensayo.

En la tabla 2.4 se presentan los datos de los estudios realizados por Wong [17] para la determinación de la conductividad térmica de diferentes diseños de hormigones porosos. En la columna "Espécimen" se pueden encontrar los ensayos, con sus características, que se utilizaron en el estudio. Los primeros números definen el coeficiente de llenado de la probeta, los siguientes dos dígitos representan la relación a/c y el último dígito es el número de referencia de la muestra.

Por ejemplo un ensayo con denominación "D50/35/2" corresponde a una formulación con un 50% del espacio ocupado por cemento, una relación a/c de 0,35, y un número de referencia de dos. Con el fin de obtener un número significativo de ensayos, cada probeta se cortó en dos partes (A-B) como se muestra en tabla 2.4, y se midió el valor de conductibilidad térmica.

Probeta	Conductividad térmica [Wm/k]						
	0,3	0,35 A 0,45 A		А	0,60 A		
	А	В	А	В	А	В	
D100/25/1	1,34	1,44	1,34	1,47	1,31	1,40	
D100/25/2	1,41	1,53	1,46	1,38	1,47	1,46	
D100/25/3	1,50	1,52	1,49	1,45	1,45	1,46	
D60/25/1	0,97	1,08	0,97	0,99	0,97	1,00	
D60/25/2	1,07	1,00	1,02	1,01	1,06	1,02	
D60/25/3	0,96	1,03	1,00	1,01	1,01	0,99	
D60/35/1	0,94	0,96	0,95	0,96	0,94	0,95	
D60/35/2	0,90	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	
D60/35/3	0,89	0,84	0,88	0,89	0,87	0,87	
D50/25/1	0,90	0,94	0,89	0,95	0,86	0,94	
D50/25/2	0,90	0,87	0,95	0,84	0,92	0,85	
D50/25/3	0,95	0,83	0,93	0,85	0,89	0,89	
D50/35/1	0,83	0,75	0,81	0,75	0,78	0,73	
D50/35/2	0,79	0,74	0,78	0,75	0,81	0,72	
D50/35/3	0,66	0,59	0,64	0,62	0,72	0,61	
D0/0/1	0,19	N/A	0,19	N/A	0,20	N/A	

**Tabla 2.4:** Resultados experimentales de medición de la conductividad térmica del hormigónporoso utilizando el método del hilo caliente [17].

En la tabla 2.4, se puede observar que se produce un aumento notable de la conductividad térmica si el coeficiente de llenado de los vacíos aumenta, es decir, si existe una mayor cantidad de material sólido. Además para los ensayos con el mismo coeficiente de llenado, se nota una disminución del valor de conductividad térmica  $\lambda e$  con el aumento de la relación a/c. Esto se debe al hecho que con relaciones a/c relativamente bajas, como por ejemplo de 0,25, toda el agua reacciona químicamente en contacto con el cemento. En lugar, con relaciones a/c más elevadas, como por ejemplo 0,35, no toda el agua reacciona químicamente, y la que queda se evapora en el curso del secado, dejando un hormigón más poroso. Teniendo una porosidad más elevada, el ensayo, puede alcanzar valores de conductividad térmica más bajas por la mayor presencia de aire.

## 2.4 Discusión

Una de las primeras aplicaciones del HoPo fue como material para la construcción de pavimentos de carreteras. Su propiedad principal es la permeabilidad que permite a agua pasar a través de su interior y llegar hasta el subsuelo. Una consecuencia de esta característica ha sido la reducción de los accidentes en las autopistas debido al efecto "aquaplaning", es decir la reducción de atrito en las carreteras por la presencia de agua en superficie.

Del estudio bibliográfico, se destaca que uno de los problemas más importantes de las ciudades modernas el a sostenibilidad de las construcciones en zonas urbanas. De hecho una de las prioridades es reducir el efecto isla de calor que caracteriza las ciudades densamente pobladas. El problema que afecta a estas zonas urbanas es debido principalmente a los materiales que forman el tejido urbano, que con sus características térmicas, pueden influenciar positivamente o negativamente en el micro clima urbano.

Estudios más recientes, han por lo tanto intentado de estudiar el HoPo como un material por solucionar las problemáticas descritas anteriormente. Estos trabajos estudian porqué hay la formación de la isla el calor en una ciudad moderna, es decir principalmente medio absorción y reflexión del calor por las superficies de la ciudad. Con el 20% sobre el total de superficie, los pavimentos son los componentes que más influyen en la creación de zonas más calientes.

Los mismos estudios han destacado que el HoPo, debido al hecho que presenta una porosidad mayor respecto a hormigones convencionales, tiene una capacidad de absorber el calor mejor. Al mismo tiempo el calor que se refleja en el ambiente es menor respecto a otras mezclas. Se empezó por lo tanto a considerar su porosidad como una característica que puede solucionar no solo el exceso de agua en las carreteas sino también como un medio para absorber parte del calor en las grandes ciudades.

De acuerdo con los últimos estudios, se puede pensar que la porosidad que caracteriza al HoPo puede ser utilizada no solo para absorber el calor, sino también como una propiedad que puede hacer que se considere el HoPo como un material que puede aislar.

# CAPÍTULO 3

# MODELO DE COMPACTACIÓN

# 3.1 Introducción

Como se ha indicado en el capítulo anterior, la porosidad es la propiedad más importante del HoPo, siendo esta característica física la más afecta por las respuestas térmicas de ese material. La porosidad intrínseca del material está determinada, además del por el tipo de curva granulométrica utilizada, por la tipología y el grado de compactación que tiene el modelo. La densidad del HoPo puede variar entre 1600 y 2300 kg/m<sup>3</sup> [34] de acuerdo con las cargas aplicadas.

La variación de densidad es muy importante para el comportamiento térmico, porque con una densidad baja, se tiene un porcentaje mayor de aire. Por otro lado, con una densidad elevada los vacíos que quedan serán mínimos y se obtendrá un peor comportamiento aislante. Por tanto se puede decir que la compactación es un parámetro fundamental para el estudio de las propiedades térmicas del HoPo.

En esta investigación se analizaron once diferentes curvas granulométricas, con dos tamaños de áridos. Las diferentes curvas se obtuvieron variando el porcentaje del contenido del tamaño de árido. Además en cada curva granulométrica se tomaron veinte grupos obteniendo en total 220 diferentes modelos.

Este trabajo de tesis está englobado en un trabajo general, en colaboración con la Universidad Politécnica de Cataluña, que busca generar una herramienta para el diseño del HoPo por sus prestaciones. Cabe destacar los escasos estudios encontrados respecto a la compactación de materiales porosos. Por lo tanto, con el objetivo de determinar las propiedades térmicas, se utilizará un método que ya ha sido desarrollado y validado en la Tesis Doctoral de Ricardo Pieralisi lo cual se encuentra en proceso de publicación.

El modelo utilizado permite calcular la disposición geométrica de las partículas así como su utilización en la creación de una malla. Terminada la creación de la malla se podrá utilizar un código generado en programa de elementos finidos. El objetivo, de utilizar un modelo de compactación, es el de relacionar las propiedades térmicas con el grado de compactación, es decir con la disposición de las partículas que forman el HoPo.

#### 3.1.1 Objetivo

Los objetivos del estudio en este capítulo son:

- Descripción general del modelo utilizado en la tesis doctoral por la búsqueda de herramientas para diseñar el HoPo;
- Descripción del procedimiento para crear los archivos de entrada en el programa de análisis térmica ANSYS®;
- Presentación de los códigos de programación utilizados.

#### 3.1.2 Organización

En el segundo capítulo se han analizado los artículos más relevantes encontrados en la literatura para entender como varia el comportamiento térmico del HoPo con la variación de sus características. En la primera parte de este capítulo se presentará el modelo utilizado para la creación de los modelos necesarios para el objetivo de este trabajo de tesis. Se mostraran los algoritmos que forman la base del modelo y las diferentes etapas para llegar a cabo un modelo compactado.

En la sección 3.3 se mostrará el proceso para la creación del mallado. Este proceso generará los datos de ingreso para la análisis térmicas en Ansys®. En primer lugar se mostrará el modelo de partícula utilizado para simplificar el problema y, posteriormente, se describirán los pasos para la generación del mallado. Por último, en la sección 3.4 se presentan las conclusiones de este capítulo.

# 3.2 Descripción del modelo utilizado

La posición de los áridos, los contactos entre ellos así como la densidad del HoPo están influenciadas por el grado de compactación. Por lo tanto, con el propósito de determinar las propiedades térmicas del HoPo, se debe utilizar un modelo capaz de describir todas las interacciones entre los áridos en relación la compactación adoptada. En la figura 3.1 se indica la filosofía del modelo desarrollado por la tesis doctoral de Ricardo Pieralisi, el cual fue dividido en dos módulos complementarios.



Figura 3.1: Filosofía del modelo utilizado por la Tesis Doctoral.

Como se muestra en la figura 3.1, los datos de entrada para la generación del modelo son el tipo de curva granulométrica y la cantidad de pasta de cemento utilizada. Esos datos representan las informaciones de entrada por el primer módulo. El primer módulo, caída aleatoria, es lo que organiza las partículas en el molde y que asegura la estabilidad global y local. Terminado ese proceso, se utilizan los datos de salida como datos de ingreso por el segundo módulo. El segundo módulo, grado de compactación, es el responsable de la reorganización de las partículas después de un desplazamiento impuesto. En los próximos parágrafos se presentarán de manera general los pasos para la creación de los modelos.

## 3.2.1 Primer módulo – Caída aleatoria

Con el propósito de definir la mezcla del HoPo se debe primero, caracterizar su curva granulométrica y la cantidad de pasta de cemento en el interior del material. Estos datos definen las informaciones de ingreso por el primer módulo, lo cual se ocupa de organizar las partículas en el espacio. Pero es importante indicar que no se puede simplemente disponer las partículas de manera aleatoria, es fundamental que sea garantizada la estabilidad global y local para garantizar que las partículas no se solapan.

El algoritmo básico que se utiliza en el modelo de este estudio del HoPo, desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña, se basa en un algoritmo sencillo de aproximación numérica de distribución aleatoria ideado de [35]. Con el fin de estudiar la distribución aleatoria de las partículas en el HoPo, se modificó este algoritmo básico para representar la compactación de partículas rodeadas de una pequeña capa de pasta de cemento.

Por lo tanto, el propósito de este módulo, es encontrar una posición estable por cada partícula. El proceso para llegar a cabo de este problema, se puede dividir en tres etapas, como se presenta en la figura 3.2. Se analizarán todas las partículas que componen el modelo hasta cuando las partículas no estén en una posición estable, es decir hasta cuando todas las partículas no estén en una posición estática.



Figura 3.2: Etapas del módulo de caída aleatoria de las partículas, (a) primer paso; (b) segundo paso y (c) paso final.

Como se muestra en la figura 3.2 (a), el algoritmo escoge de manera aleatoria una coordinada *x* para empezar el proceso de caída de la partícula analizada. Posteriormente,

en figura 3.2 (b), el algoritmo identifica el contacto con el primer elemento que la partícula encuentra durante su caída. Esto permite que la partícula, cayendo de una posición aleatoria, no se solape con las otras partículas que ya están en posición estática. Por un lado, si la partícula en caída se encuentra directamente la superficie del molde, significa que está ya en posición estable y por lo tanto se convierte en estática. De otro lado, si el contacto ocurre con otra partícula, empieza la tercera etapa para hacer que la misma se encuentre en condición estable.

En el tercer paso, ilustrado en la figura 3.2 (c), la partícula que no ha encontrado la superficie del molde, empieza el proceso que la llevará a obtener la condición estable. El elemento analizado gira sobre las otras partículas que están debajo de él. El movimiento se puede detener por dos acciones: si se produce otro contacto o si se produce la escisión completa sin contacto. En el primer caso, es decir cuando ocurre otro contacto, se analiza la partícula con el fin de entender si se encuentra en un lugar estable. Si la partícula está en condición estática, el proceso se considera terminado y se empieza de nuevo con el primer paso con una nueva partícula. Por otro lado, si no se llega a una posición estable, con la misma partícula, se empieza en el primer paso, pero no con coordenadas aleatorias si no que se utilizan las coordenadas obtenidas en el final de la tercera etapa.

Cuando la partícula se encuentra en una posición estable, el algoritmo admite que se pueda deformar un poco en la región de contacto. De hecho, las partículas están rodeadas por una capa de pasta de cemento, la cual se puede deformar. La filosofía utilizada en el algoritmo desarrollado en el estudio, como se muestra en la figura 3.3, admite que cuando se produce un solapamiento de las capas de cemento que rodean dos partículas, esas se pueden deformar.



Figura 3.3: contacto entre dos partículas con solapamiento de la capa de pasta de cemento.

Como base para esta consideración, el algoritmo utiliza la ley de contacto Hertziano, presentada en la ecuación 3.1. De hecho este tipo de contacto permite un pequeño solapamiento de la capa externa ( $\delta_h$ ) en razón de las propiedades de los materiales ( $k_a$ ) y de la carga presente (F).

$$l = 2 \cdot k_a \cdot \sqrt[3]{F} \tag{3.1}$$

Con esas consideraciones, la partícula termina su posicionamiento, por lo tanto el proceso puede ser reinicializado por la caída de otro elemento. Este proceso se repite para todas las partículas, hasta cuando no se alcanza un estado estable para todas ellas y el molde no está lleno.

Como se ha destacado en la revisión bibliográfica, la propiedad principal del HoPo es su permeabilidad y porosidad. Estas características afectan de manera importante a las propiedades térmicas del HoPo y, por lo tanto, se debe eliminar el fenómeno de segregación. Este fenómeno ocurre cuando las partículas más grandes, es decir más pesadas, ocupan el espacio cerca de la periferia del molde no permitiendo la permeabilidad del modelo.

Para evitar estos problemas se adoptaron en el algoritmo utilizado dos cambios: uno es circa las coordenadas de partida y el otro es un código de verificación. Las coordenadas de partida están caracterizadas por un eje horizontal aleatorio y un eje vertical fijo, esto ayuda a reducir el giro sobre el lecho granular. El código de verificación analiza el espacio por debajo de la partícula y busca los grandes huecos. Si el código de verificación encuentra alrededor de la partícula estos grandes huecos, la partícula empezará nuevamente el proceso de caída.



Figura 3.4: Resultado final del primer módulo.

En la figura 3.4, se muestra el resultado final del primer módulo. Como se observa, se obtiene un modelo con una distribución completamente aleatoria de las partículas. Se puede también ver que hay un ligero solapamiento de la capa de pasta de cemento en las zonas de más presión. Además se puede apreciar cómo, a través del código de verificación, no se presenta el fenómeno de la segregación que afectaría al comportamiento térmico del modelo.

## 3.2.2 Segundo módulo – Compactación medio compresión

En la revisión bibliográfica se ha destacado que una de las propiedades que más influye en el comportamiento térmico es su contenido de aire. La porosidad tiene una correlación con el grado de compactación, es decir, teniendo dos modelos con igual número y características de partículas, el que presente un contenido de aire mayor, tendrá un grado de compactación menor. Es importante por lo tanto incluir el grado de compactación en la definición de los modelos utilizados por esto trabajo.

Este módulo, por lo tanto, es lo que define la compactación de los modelos a través de un desplazamiento de compresión vertical. Es decir, una vez obtenido el modelo al final del primer módulo del algoritmo, aplicar al mismo una compactación definida y calcular la nueva posición geométrica de todas las partículas. El algoritmo considera solamente un desplazamiento vertical sin agitación del modelo generado.

Ya que el fin de este trabajo no es la definición del algoritmo por la determinación de la compresión, se muestra en figura 3.5 el algoritmo ya desarrollado por el trabajo de tesis doctoral. Con el fin de entender su filosofía, posteriormente se describirá de manera general su funcionamiento.





En la en figura 3.5 se puede observar cómo, el proceso se basa principalmente en el método de los elementos finitos (MEF). El algoritmo empieza con una triangulación de los elementos donde se crean los nodos y las vigas que conectan las partículas. Posteriormente a través del método de los elementos finitos se calcula la posición de las partículas después del desplazamiento, teniendo en cuenta todas sus características. Se procede por lo tanto a las verificaciones y, si estas son positivas, se puede pasar a la siguiente etapa, si no se vuelve al primer paso y se empieza nuevamente el proceso.

En el proceso de triangulación se relacionan todas las coordenadas de las partículas y se hace una verificación geométrica, esto conecta los centros de las partículas que tienen relaciones con una viga. Después del proceso de triangulación, los datos de salida son nodos y vigas que sirven como datos de entrada para el proceso MEF. El proceso MEF analiza por lo tanto los nodos y las vigas y produce nuevas coordenadas después de la compactación. Obtenidas las nuevas coordenadas se hacen verificaciones con el fin de no admitir soluciones que presenten solapamientos entre los áridos y que las partículas no atraviesen las paredes del modelo.



**Figura 3.6:** Aplicación del algoritmo por el modelo mostrado en figura 3.6, se muestran diferentes grados de compactación por el mismo modelo; (a) 5% de compactación, (b) 10%, (c) 15% y (d) 20%.

La figura 3.6 muestra un ejemplo de compactación según el algoritmo desarrollado, en la ilustración (a) se aplica una compactación del 5%. Las flechas indican la trayectoria que las partículas seguirán y el estado tensional, más larga es la flecha y más grande será el esfuerzo a que están sometidas. Se puede indicar que a medida que sube el grado de compactación, disminuyen los huecos en el modelo, obteniendo una densidad mayor.

## 3.3 Proceso de creación mallado

Obtenido el modelo con el algoritmo ilustrado anteriormente, el problema mayor es individualizar los diferentes elementos. De hecho el HoPo es un material heterogéneo, es decir, los materiales que lo componen tienen características diferentes. Por lo tanto el fin de la creación del mallado deberá ser la generación de una malla capaz de entender si el elemento es árido, si la pasta es de cemento o de aire y las interacciones entre los elementos.

Antes de definir el proceso que llevará a la creación de la malla, fundamental por el análisis térmica en Ansys®, se debe definir las características y las asunciones que se adoptan por el diseño de las partículas. Como se ha indicado en la bibliografía, los áridos pueden tener características muy diferentes entre ellos, así como el espesor de pasta de cemento que rodea los áridos, que puede variar en cada caso. Por lo tanto es necesario crear un modelo para el comportamiento de las partículas con el fin de simplificar el problema.

## 3.3.1 Modelo de las partículas

En la realidad las partículas utilizadas en el modelo tienen una conformación muy compleja, es decir, una conformación aleatoria, que no permitiría su empleo en un modelo simplificado. Es por lo tanto necesario definirlas y simplificarlas de manera que puedan incluirse en el algoritmo. Las partículas están compuestas por dos materiales diferentes, al árido y la pasta de cemento.

En acuerdo con el estudio presentado en la revisión de la literatura [17], se pueden simplificar las partículas a círculos rodeados por una capa de pasta de cemento. Estas esferas tendrán el radio que se ha escogido en fase de diseño de la mezcla. La figura 3.7, presenta un dibujo esquemático de la partícula en estudio.



Figura 3.7: Representación esquemática de la partícula estudiada.

En la figura 3.7, se puede observar un círculo interior que representa el árido de radio  $R_{ar}$  y un círculo exterior que representa la pasta de cemento que rodea al árido. El radio total de la partícula, indicado como  $R_p$ , comprende el radio del árido más la capa de pasta de cemento.

El algoritmo utilizado permite el solapamiento solamente de la capa de cemento y considera el núcleo del agregado como rígido. Por lo tanto, como se presenta en la figura 3.8, son posibles cuatros diferentes interacciones entre las partículas. Para definir los diferentes casos, el algoritmo utiliza las vigas generadas en el proceso de compactación, y dependiendo de su dimensión define las relaciones entre las partículas.



Figura 3.8: tipos de relaciones entre partículas: ningún contacto (a); Contacto entre el mortero (b); Solapamiento del mortero (c) y contacto entre los agregados (d).

En el primer caso (a) se obtiene cuando los centros de las partículas son más distantes que la suma de los dos radios de las partículas ( $d > R_{p,i} + R_{p,j}$ ), en este caso no hay ningún contacto. En la figura 3.8 (b) y (c) se ilustran dos casos, el primero cuando el mortero de las partículas está en contacto y el segundo se produce un solapamiento de la pasta de cemento. En estos casos, el radio total de las dos partículas es igual o menor que la distancia entre los centros de las mismas ( $d \le R_{p,i} + R_{p,j}$ ). El último caso que se muestra en figura 3.8 (d), se obtiene cuando los dos áridos están en contacto, es decir que se produce un solapamiento de la capa de pasta de cemento permitiendo el contacto entre los áridos. Este último caso se verifica cuando la suma de los radios de las dos partículas es igual a la distancia de las partículas ( $d = R_{ar,i} + R_{ar,j}$ ).

# 3.3.2 Creación de los nodos y de las vigas

Una vez que se han descrito las partículas y los tipos de contactos entre ellas, se debe generar el mallado. El mallado que se generará, será el dato que se utilizara para el análisis de los modelos con el programa Ansys ®. Como se ha descrito anteriormente, la primera etapa es el proceso de triangulación del modelo. En la figura 3.9 se muestran los datos de salida del proceso de triangulación.

Este módulo sirve a la creación de los nodos y de los elementos internos del modelo. Para la creación de la malla, es necesario crear nodos y vigas que los conecten. Los nodos que vienen creados por el algoritmo, corresponden con los centros de las partículas descritas anteriormente. De esta manera, se obtienen puntos que representan las diferentes partículas en el modelo. Estos nodos vienen posteriormente conectados mediante vigas. Estas conexiones tienen la tarea de describir las relaciones entre los diferentes nodos.

La organización de los nodos y de las vigas descrita anteriormente, puede generar una estructura interna inestable. De hecho esto no afecta a los resultados, por el contrario, ayuda a la reordenación de las partículas.



Figura 3.9: Datos de salida después el proceso de triangulación.

La triangulación mostrada en la <mark>figura 3.9</mark>, es un proceso de generación del mallado que trabaja con elementos y vigas. Este proceso se hace para cada diferente paso de carga. Por lo tanto, al variar el grado de compactación, se desarrolla una nueva malla con una diferente organización respecto a la anterior. Como se ha descrito anteriormente, el proceso de generación de esta malla triangular, presenta alguna inestabilidad. Con el fin de alcanzar la estabilidad interna de la estructura ha sido necesario incrementar el número de vigas.

#### 3.3.3 Análisis de los nodos y de las vigas

Los nodos y las vigas creadas anteriormente se analizan a través del proceso MEF. El proceso MEF tiene, por lo tanto, la tarea de analizar los nodos y las vigas que fueron creadas en el módulo anterior. Además el proceso MEF resuelve las ecuaciones matriciales generadas en la etapa anterior. Para la resolución, el proceso MEF, considera que todos los nodos tienen dos grados de libertad en las dos direccione ortogonales.

La Figura 3.10 presenta el caso general de una viga generada entre dos nodos. Cada viga tiene ejes locales que pueden ser relacionados con los ejes globales. La utilización de ejes locales, es un expediente utilizado en el algoritmo desarrollado por Pieralisi para simplificar los cálculos de las fuerzas y de los nodos. Al final del proceso, todos los parámetros calculados localmente vienen expresados en coordenadas locales.



Figura 3.10: fuerzas y tensiones en los nodos de una viga.

Posteriormente se mostrarán, para una mayor claridad, las ecuaciones utilizadas en el algoritmo desarrollado en la tesis doctoral de Pieralisi. La ecuación 3.2 muestra la relación entre los ejes globales y locales. En la ecuación 3.3, se muestra la relación entre las fuerzas y las tensiones en un nodo general (*i*). Después se estudiará el equilibrio de la viga

presentada en la figura 3.10 a través de la ecuación 3.4. Una vez que se han calculado estos parámetros, se combinan las ecuaciones 3.2, 3.3 y ecuación 3.4 para dos nodos conectados utilizando la ecuación 3.5 de forma matricial.

$$q_{i}^{(e)} = \frac{R_{xi}^{(e)}}{R_{yi}^{(e)}} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{bmatrix} \cdot R_{i}^{(e)} = \begin{bmatrix} L^{(e)} \end{bmatrix}^{T} \cdot R_{i}^{(e)}$$
(3.2)

$$\delta_i^{(e)} \cdot L^{(e)} = \begin{bmatrix} u_i^{(e)} \\ v_i^{(e)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \end{bmatrix} = \delta_i^{(e)}$$
(3.3)

$$R_1^{(e)} = -R_2^{(e)} = k^{(e)} \cdot \left(\delta_1^{(e)} - \delta_2^{(e)}\right), \quad k^{(e)} = \left(\frac{E \cdot A}{l}\right)^{(e)}$$
(3.4)

$$\begin{bmatrix} q_1^{(e)} \\ q_2^{(e)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11}^{(e)} & K_{12}^{(e)} \\ K_{21}^{(e)} & K_{22}^{(e)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_1^{(e)} \\ \delta_2^{(e)} \end{bmatrix}, \quad K_{ij}^{(e)} = k^{(e)} \cdot \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cdot \cos \alpha \\ \sin \alpha \cdot \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}$$
(3.5)

La ecuación general para un complejo más entramado, se describe en la ecuación 3.6, es la ecuación general utilizada en el algoritmo desarrollado por Pieralisi.

$$\begin{bmatrix} R_{x1}^{(e)} \\ R_{y1}^{(e)} \\ \vdots \\ R_{xn}^{(e)} \\ R_{yn}^{(e)} \\ R_{yn}^{(e)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11}^{(e)} & K_{12}^{(e)} & \cdots & K_{1n}^{(e)} \\ K_{21}^{(e)} & K_{22}^{(e)} & \cdots & K_{2n}^{(e)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1}^{(e)} & K_{n2}^{(e)} & \cdots & K_{nn}^{(e)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1^{(e)} \\ v_2^{(e)} \\ \vdots \\ u_n^{(e)} \\ v_n^{(e)} \end{bmatrix}$$
(3.6)

Las condiciones al contorno por la resolución MEF son en primer lugar, que todas las partículas que están en contacto con el fondo o las paredes del modelo, tienen un desplazamiento fijo y, en segundo lugar, que todas las partículas encima del modelo tienen un desplazamiento inducido. La rigidez de las vigas está constantemente cambiando en cada etapa en función de la distancia entre las partículas.

#### 3.3.4 Verificaciones

Esta función es responsable de verificar que las condiciones al contorno descritas anteriormente sean satisfechas. Si las verificaciones son correctas, el proceso puede ser cerrado y se puede empezar con otro desplazamiento. En caso contrario, la matriz de las fuerzas y tensiones están cambiadas y se empieza nuevamente el proceso MEF.

En la figura 3.11 se presentado los dos casos que pueden ocurrir en el modelo que cambian las condiciones del contorno. En el primer caso, figura 3.11 (a.1), se muestra el caso donde la reacción calculada en el suporte está en dirección contraria a la pared del contenedor. En este caso, el cambio que se hace es la exclusión del suporto, como se muestra en la figura 3.11 (a.2), el segundo caso, mostrado en figura 3.11 (b.1), la partícula tiene un estado tensional muy elevado y pasa a través de la pared del contenedor. La corrección que se hace en este caso es introducir otro suporte a la partícula, como se muestra en la figura 3.11 (b.2).



Figura 3.11: Cambios en las condiciones al contorno.

Otra verificación hecha en el módulo "verificaciones" es mirar si hay solapamientos entre las partículas. Este fenómeno puede ocurrir después que el proceso MEF haya calculado las diferentes tensiones. En la figura 3.12 se muestra el solapamiento de dos partículas. A diferencia de los casos presentados anteriormente, el algoritmo no vuelve a empezar otra vez con el proceso MEF. En este caso, el algoritmo aumenta, en la etapa siguiente, el desplazamiento de las partículas solapadas.


Figura 3.12: Solapamiento entre las partículas.

Hay la pasibilidad que el mallado tenga una inestabilidad global, esto significa que la matriz no puede ser invertida. En este caso el algoritmo de verificación vuelve a iniciar proceso de triangulación descrito anteriormente con el propósito de aumentar la distancia mínima entre las partículas. El proceso general es parado con el algoritmo de compresión descrito anteriormente.

### 3.4 Discusión

En este capítulo se ha mostrado el algoritmo desarrollado en el trabajo hecho por la Universidad Politécnica de Cataluña cuyo propósito es generar una herramienta para diseñar el HoPo según sus prestaciones. El fin de este trabajo de tesis es evaluar las prestaciones térmicas del HoPo según su diseño y para lo cual se utiliza el algoritmo ya desarrollado para determinar las propiedades necesarias en este estudio.

Como se ha destacado en el capítulo de revisión bibliográfica, uno de los factores que más influye en el comportamiento térmico del HoPo, además de las propiedades de cada material, es la organización de las partículas en el espacio. En este capítulo se ha mostrado que la organización de los áridos en el modelo depende de la forma del mismo y, sobre todo, del grado de compactación.

Además de la posición geométrica que los áridos van a ocupar, es muy importante para describir el comportamiento térmico, también la interacción entre las diferentes partículas. De hecho, cuando no hay contacto entre ella, el calor debería propagarse al aire que ocupa el espacio, el cual presenta una conductividad térmica baja. Cuando hay contacto entre los áridos, el calor se debería propagar a través de un medio solido con conductividad alta, determinando un comportamiento a peyorar. Al calor. Se intuye por lo tanto que el grado de compactación es el factor que más influye las propiedades del HoPo.

# CAPÍTULO 4

# MODELO TÉRMICO

# 4.1 Introducción

En este capítulo se explicará brevemente la herramienta de simulación de ANSYS y sus distintas opciones de cálculo. Además se presentará la filosofía de trabajo para los modelos térmicos.

ANSYS Inc. fue fundada en 1970 (Swanson Analysis Systems, Inc.), este programa desarrolla y presta soporte a la ingeniería introduciendo nuevos métodos para conseguir productos y procesos de fabricación más innovadores. Este programa busca tanto una reducción de los costes así como del tiempo invertido hasta la comercialización del producto, a través de la utilización del software de elementos finitos destinados a la simulación, que predicen cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real [10].

ANSYS es un programa de elementos finitos que originalmente ofrecía soluciones para resolver análisis estáticos lineales. Sucesivamente se han ido introduciendo módulos con los que este programa es capaz de resolver además problemas dinámicos no lineales. Los principales módulos de ANSYS son: Multiphysics, Mechanical, Structural, Professional, Design Space, Emag (simulaciones Electromagnéticas), Paramesh (mallas adaptativas), LSDYNA y Educational [36]. Este programa es capaz de solucionar procesos implícitos, es decir, resuelve sistemas estáticos/cuasi-estáticos (condiciones al contorno aplicadas en grandes lapsos de tiempo) en los que el sistema se comporta de forma lineal [11].

## 4.2 Elementos térmicos

Ansys ® cuenta con una gran variedad de elementos para realizar análisis térmicos, como se puede observar en la tabla 4.1. El tipo de elemento escogido, dependerá del análisis que se quiera realizar.

Tipo de elemento	Elemento	Características
	Link-32	Conducción lineal en 2D, 2 nodos
LINK	Link-33	Conducción lineal en 3D, 2 nodos
	Link-34	Convección lineal en 3D, 2 nodos
	Plane-35	Triangulo, 6 nodos
	Plane-55	Cuadrilátero, 4 nodos
PLANE	Plane-75	Armónico, 4 nodos
	Plane-77	Cuadrilátero, 8 nodos
	Plane-78	Armónico, 8 nodos
SHELL	Shell-57	Cuadrilátero, 4 nodos
	Solid-70	Hexaedro, 8 nodos
SOLID	Solid-87	Tetraedro, 10 nodos
	Solid-90	Hexaedro, 20 nodos

Tabla 4.1: Tipos de elementos para análisis térmicos.

En esta tesis, se ha utilizado el elemento PLANE-55, cuyo funcionamiento se explicares en este capítulo. El tipo de elemento utilizado se muestra en la figura 4.1. El grado de libertad del elemento es la temperatura en sus nodos. Las cargas que se pueden aplicar sobre sus caras son convección, flujo de calor o tasas de generación de calor.



Figura 4.1: Elemento PLANE-55.

El elemento presentado en figura 4.1, ha sido utilizado para la creación del mallado, es decir para la creación de la malla que describe el modelo estudiado. A través del mallado obtenido de esta forma es posible simplificar el modelo muy complejo con elementos pequeños y que pueden ser sencillamente calculados.

# 4.3 Mecanismos de transferencia de calor

Ansys® permite realizar dos tipos de análisis térmico, en estado estable o en estado transitorio. Los análisis transitorios pertenecen a la categoría de análisis no lineales, es decir dependientes del tiempo. De acuerdo con los estudios presentados en los primeros capítulos, se puede decir que el cambio en el tiempo de las temperaturas en estos modelos, puede ser ignorado. Por lo tanto en este capítulo se enfocará la descripción sobre problemas de conducción y convección.

### 4.3.1 Conducción

El fenómeno de conducción consiste en trasferir calor de manera continua a través de la materia de una región de alta temperatura a otra de baja temperatura dentro de un medio (solido, líquido o gaseoso) o entre medios diferentes en contacto directo. La ley de Fourier relaciona la rapidez de flujo de energía con la diferencia de temperatura, con la simplificación en una dimensión, se presenta en la ecuación 4.1.

$$Q = -\lambda * A * \frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{4.1}$$

Siendo Q el flujo de calor, A el área normal a la dirección de flujo de calor y  $\frac{\Delta T}{\Delta x}$  el gradiente de temperatura en la dirección considerada (x) y  $\lambda$  la constante de proporcionalidad, denominada conductividad térmica. La conductividad térmica, como se ha indicado anteriormente, es la capacidad de los cuerpos o sustancias de conducir calor. El valor de conductividad térmica varía con el material utilizado.

#### 4.3.2 Convección

Es un mecanismo de transferencia de energía que involucra conducción y transporte de energía por medio del movimiento de la materia. Puede ser de tipo natural o forzada. La relación que rige la convección se muestra en ecuación 4.2.

$$Q = -h * A * \Delta T \tag{4.2}$$

En donde Q es el flujo de calor, A es el área normal al flujo de calor,  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura y h es el coeficiente de transferencia. Este coeficiente varía con las propiedades del fluido (densidad, conductividad térmica, calor específico y difusividad), con la velocidad de transferencia, el tipo de superficie, etc.

En el presente trabajo, se ha considerado solo el caso de conducción interna de los modelos, porqué se ha retenido, no influyendo de la transferencia medio convección. En trabajos futuros, este estudio podrá ser ampliado con la inclusión de los fenómenos de convección interna de los modelos de HoPo.

### 4.4 Análisis de los modelos generados

El algoritmo definido por el estudio hecho en la Universidad Politécnica de Cataluña, permite poner el archivo de salida directamente en Ansys® para el análisis térmico. En el archivo de salida se encuentran todas las informaciones que el programa necesita para el análisis.

Efectivamente, en el archivo de salida, están presentes informaciones del tipo de análisis que debe ser efectuada en Ansys®. Además, como se describe en el capítulo del modelo de compactación, también está totalmente definida la geometría del problema. Es decir, las dimensiones de los modelos a analizar y también la disposición de las partículas a su interior.

Posteriormente, en el código 4.1, se muestra el archivo de salida del algoritmo utilizado en este trabajo de tesis.

1	/BATCH
2	!/COM,ANSYS RELEASE 9.0A1 UP20050128 10:50:54 05/17/2013
3	/FILNAME,Analisis termica,0
4	/CWD,C:\Users\Marco\Desktop\Trabajo de tesi\Thermal_Analysis\R11-0- 0\G1\Compactação\95
5	/TITLE,modelo01
6	!/REPLOT,RESIZE
7	!*
8	/NOPR
9	/PMETH,OFF,0
10	KEYW,PR_SET,1
11	KEYW,PR_STRUC,0
12	KEYW,PR_THERM,1
13	KEYW,PR_FLUID,0
14	KEYW,PR_ELMAG,0
15	KEYW,MAGNOD,0
16	KEYW,MAGEDG,0
17	KEYW,MAGHFE,0
18	KEYW,MAGELC,0
19	KEYW,PR_MULTI,0
20	KEYW,PR_CFD,0
21	KEYW,LSDYNA,0
22	/GO
23	!*
24	!/COM,
25	! /COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
26	!/COM, Thermal
27	
28	!* White Background
29	
30	/KGB,INDEX,100,100,100,0
31	/ ΝΩΟ,ΙΝΡΕΛ, Ου, Ου, Ου, 13
34	/ KGD, INDEA, OU, OU, OU, 14 /DCD INDEX 0.0.015
33	רעט,וועענג, ט, ט, ט, ט, ני, ט, ט, ט, ט, ט

34	!*
35	/PREP7
36	*
37	!* Define Geometry
38	height=0.037246
39	width = 0.040000
40	number of nodes $-149974$
40	number_of_alomate=140200
41	number_or_elemets=149200
42	
43	
44	ET,1,PLANE55
45	!*
46	**************************************
47	!* Material Props !
48	[*************************************
49	!* Element: Air
50	MP,Dens,1,1.225 ! Density - kg/m^3
51	MP.C.1.1006 ! Specific heat - I/kg*K
52	MP KXX 1 0 025 / Thermal conductivity - W/(m*K)
52	*
54	I*
54	: I* Element: Deste
55	MD Dong 2 1000 Dongitus kg/m/2
50	$MP, Dens, 2, 1800 \qquad ! Density - kg/m^{-3}$
57	MP,C,Z,736 ! Specific heat - J/kg*K
58	MP,KXX,2,0.955 ! Thermal conductivity - W/(m*K)
59	!*
60	!*
61	!* Element: Aggregate
62	MP,Dens,3,2500 ! Density - kg/m^3
63	MP,C,3,908 ! Specific heat - J/kg*K
64	MP,KXX,3,2.5 ! Thermal conductivity - W/(m*K)
65	***************************************
66	!* Nodes Creation !
67	*****************************
68	n. 1. 0.000000. 0.000000
69	n. 2. 0.000100. 0.000000
150041	n 149973 0 039900 0 037246
150041	n $149074$ 0 $0.0000$ 0 $0.007246$
150042	II, 149974, 0.040000, 0.037240
150045	
150044	!" Element Creation !
150045	
150046	
150047	
150048	!* Change to element Air
150049	TYPE, 1
150050	MAT, 1
150051	REAL,
150052	ESYS, 0
150053	SECNUM,

150054	e, 1,	2,	403,	402
150055	e, 2,	3,	404,	403
150056	e, 3,	4,	405,	404
150057	e, 4,	5,	406,	405
150058	e, 5,	6,	407,	406
150059	e, 5,	6,	407,	406
299267	e, 1479	950,	14795	1,148352,148351
299268	e, 1479	950,	14795	1,148352,148351
299269	<b>!</b> *****	*******	*******	*********
299270	!* (	Contour	condition	ns !
299271	<b>!</b> *****	*******	*******	*********
299272	/PREP	7		
299273	FLST,2	2,401,1,0	ORDE,2	
299274	FITEM	,2,1		
299275	FITEM	,2,-401		
299276	!*			
299277	/G0			
299278	D,P512	X, ,0, , , ,T	ГЕМР,,,,	)
299279	FLST,2	2,401,1,0	ORDE,2	
299280	FITEM	,2,1495	74	
299281	FITEM	,2,-1499	974	
299282	!*			
299283	/GO			
299284	D,P512	X,,20,,,	,TEMP, , ,	,,,
299285	/SOL			
299286	/STAT	US,SOLI	J	
299287	SOLVE	1		
299288	FINISH	ł		
299289	/POST	'1		
299290	ETABL	LE, ,TF,Y		
299291	!*			
299292	SSUM			

**Código 4.1:** Archivo de salida del algoritmo utilizado.

En las primeras líneas del código presentado anteriormente, se describen principalmente las posiciones de los diferentes archivos y de la línea 8 a la línea 21, se presentan todas las diferentes tipos de análisis que el ANSYS® puede hacer. Para este estudio, se necesita solamente el análisis térmico, por lo tanto, en la línea 12 se decide qué tipo de análisis se hará, es decir el análisis térmico de los modelos. En las líneas siguientes, se describen simplemente los colores de preferencia que se quieren en el archivo de salida del Ansys ®.

En las líneas 37,38 y 39 se definen las dimensiones del modelo de analizar, las unidades de medida están en metros. En línea 44, se muestra cual es el tipo de elemento que se ha escogido para el análisis del modelo. Como se ha descrito anteriormente, el modelo

que ha sido empleado es el PLANE-55. En la línea 47 se empieza a describir las propiedades de los materiales empleados por la simulación de los modelos.

Efectivamente de la línea 40 a 64, se describen las tres propiedades de los materiales simulados. Empezando con el aire, pasando por la pasta de cemento y terminando con los agregados. Para cada material se indica el valor de densidad (kg/m<sup>3</sup>), de calor específico (J/kgK) y de conductividad térmica (W/mK).

Después de haber descrito el tipo de análisis que se quiere hacer, las dimensiones de los modelos a analizar y las propiedades de los materiales que lo componen, el algoritmo empieza a crear los nodos para la creación del mallado. Como se puede apreciar desde la línea 66 a la línea 150042, el algoritmo describe los nodos que forman el modelo. Cada nodo está caracterizado por dos coordenadas que permiten individualizar unívocamente el nodo en cuestión.

Como se indica en la figura 4.1, cada elemento está formado por cuatros nodos, cada uno está en el vértice del cuadrilátero. De hecho, una vez determinados todos los nodos que son presentes en el modelo, es necesario determinar los diferentes elementos que componen el modelo. Como se puede observar desde la línea 150054 a la línea 299268, el algoritmo describe cada elemento que está en el modelo con cuatro valores.

Los valores que describen la posición de los cuatros vértices de cada elemento se refieren al número del nodo que ocupa el vértice. Es decir, por el elemento número 1, los cuatros vértices son descritos por los nodos 1, 2, 402 y 403. Sabiendo el número del nodo, se determina fácilmente la posición exacta del nodo a través le coordenadas calculadas anteriormente.

El algoritmo es además capaz de individualizar el tipo de material que constituye el elemento. Es decir, asignar a cada elemento, el respectivo material descrito al principio del algoritmo. De esta manera, el modelo está totalmente mallado y a cada elemento se asignan las propiedades de densidad, calor especifico y conductividad térmica dependiendo de que se trata de aire, pasta de cemento o agregados.

Después de haber descrito todos los elementos que componen el modelo, el algoritmo generado, está listo para ser analizado del Ansys®. Las últimas líneas, de la 299270 a la 299292, describen las condiciones al contorno por el modelo. En este caso, se simula un flujo de calor en dirección Y, aplicando una temperatura de 20°C en la parte superior y una temperatura de 0°C en la parte inferior. Una vez analizado el modelo con estas configuración, es necesario cambiar condiciones del entorno en Ansys® con el fin de simular un flujo de calor en dirección X y calcular las propiedades del modelo en estas condiciones.

Una vez insertado el modelo en el Ansys®, es necesario simplemente solucionar el modelo generado anteriormente a través la herramienta "Solve-Current LS". Una vez solucionado el modelo, como se muestra en la figura 4.2, es posible observar las isotermas en el modelo en las dos direcciones.



Dirección Y - Compactación 5% Dirección X - Compactación 5% Figura 4.2: Ejemplo de isotermas después del análisis a través Ansys®.

Ansys® ofrece también la posibilidad de observar el flujo de calor que caracteriza el modelo simulado. En la figura 4.3 se muestra el mismo modelo presentado en la figura 4.2, destacando el flujo de calor que pasa por el modelo generado.





Dirección Y - Compactación 5% Dirección X - Compactación 5% **Figura 4.3:** Distribución del flujo de calor obtenido a través el análisis con Ansys®.

Las figuras 4.2 y 4.3 presentan una descripción cualitativa del andamiento de las isotermas y del flujo de calor en los modelos. A través de Ansys® es posible también obtener los valores efectivos, necesarios posteriormente para la determinación de las propiedades de calor especifico, conductividad térmica y difusividad térmica.

Una vez analizados todos los modelos generados a través del algoritmo presentado y con las características presentadas en el tercer capítulo, es posible calcular las propiedades del HoPo. En el próximo capítulo se presentará come se han calculados las diferentes propiedades y se presentaran los resultados obtenidos.

# CAPÍTULO 5

# **PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS**

# 5.1 Introducción

En los capítulos anteriores se ha presentado el algoritmo desarrollado por la Tesis Doctoral de Ricardo Pieralisi que ha sido utilizado también en este trabajo. El algoritmo, como se ha comentado anteriormente, busca encontrar una herramienta para el diseño del HoPo según sus propiedades. El propósito de esta tesis es describir las propiedades térmicas del HoPo en relación a su diseño.

Como se indica en los capítulos anteriores, el grado de compactación, es un aspecto fundamental que afecta de manera importante las propiedades térmicas. El trabajo experimental, ha sido enfocado en la búsqueda de las características térmicas y en las variaciones del comportamiento térmico del HoPo al variar el grado de compactación.

Otra característica que influye de manera importante en el comportamiento térmico del HoPo es la organización de las partículas y sus interacciones. De hecho la partícula, que ha sido presentada en el capítulo tres, en realidad, puede asumir cualquier posición en el espacio. Por lo tanto, se mostrará como las propiedades térmicas pueden cambiar con la variabilidad de la posición de los agregados.

## 5.1.1 Objetivo

Los objetivos de este capítulo son:

- Describir como han sido preparados y agrupados según sus propiedades los diferentes modelos estudiados en este trabajo de tesis;
- Presentar, utilizando las ecuaciones y los resultados obtenidos en el cuarto capítulo, los valores para las diferentes propiedades térmicas del HoPo;

• Discutir brevemente los resultados obtenidos destacando las consideraciones más importantes que serán luego analizadas en detalle en el sexto capítulo.

#### 5.1.2 Organización

En la primera parte de este capítulo se presentarán los criterios mediantes los cuales se han individualizado las características de las probetas. Una vez presentado de esta manera la filosofía de trabajo, en el apartado 5.3 se presentarán los resultados obtenidos mediante la aplicación de las formulas presentadas en el cuarto capítulo. En este apartado se presentarán los resultados de densidad, calor especifico, conductividad térmica y difusividad térmica de los modelos al variar la granulometría y del grado de compactación.

Cada propiedad del HoPo estudiada en este capítulo, se presentará por la dirección X y también Y a excepción de la densidad y del calor especifico que no varían su valor a según de la dirección. Al final de la presentación de los resultados experimentales, se harán discusiones de carácter general sobre las temáticas más importantes destacadas en este capítulo, cuáles serán tratadas en detalle en el sexto capítulo.

#### 5.2 Diseño

Resumiendo principalmente los tipos de áridos que se emplean, la disposición de los mismos en el espacio y sobre todo el grado de compactación que se alcanza. En este apartado se mostrará por lo tanto como se han desarrollado los modelos para medir las prestaciones del HoPo al variar estas características.

#### 5.2.1 Curva granulométrica y disposición de las partículas

El tipo de curva granulométrica afecta de manera importante al comportamiento del HoPo. De hecho, si se hubiera una curva granulométrica que, con sus características, permitirá rellenar todos los vacíos, se obtendría un HoPo mucho más compacto. Esto permitiría obtener hormigones porosos que podrían alcanzar propiedades mecánicas óptimas, y al revés, no permitirán de haber buenas prestaciones térmicas. En contrario, si las propiedades de la curva granulométrica son tal de dejar vacíos en la mezcla, el HoPo habrá mejor prestaciones térmicas.

El comportamiento descrito anteriormente, tiene sus fundamentos en los artículos presentados en la revisión bibliográfica. De hecho, un material con un grado de porosidad mayor, y por tanto con un contenido de aire mayor, permite alcanzar propiedades térmicas mejores si se compara con un material compacto. Como se indica en el estudio de J.M. Wong [17], la trasmisión de calor en los materiales de construcción, se produce principalmente

por conducción. Por lo tanto, en un HoPo con un elevado contenido de poros, será posible alcanzar mejores propiedades que en un HoPo con un elevado número de contactos entre les partículas y un bajo porcentaje de poros.

Para tener en cuenta de estos aspectos, en este trabajo de tesis se han analizados diferentes curva granulométricas. Lo que caracteriza una curva granulométrica, es el tamaño de los áridos que se han empleado. En este trabajo se han utilizados dos diferentes tamaños de áridos, se ha utilizado un árido de tamaño grande, es decir de 4 mm y, un árido de tamaño menor, de 1 mm. Como se muestra en la figura 5.1, para obtener las diferentes curvas granulométricas, se ha variado el porcentaje presente de los dos tamaños.



Figura 5.1: Ejemplo de diferentes curvas granulométricas utilizadas en el estudio.

En la figura 5.1 se muestran cuatro probetas obtenidas variando el porcentaje de cada uno de los dos tamaños. En la figura 5.1 (a), se muestra la curva granulométrica obtenida con un porcentaje del 100% de áridos grandes. El opuesto se muestra en la figura 5.1 (d), donde se han utilizado solo áridos pequeños. Las figuras 5.1 (b) y (c) representan condiciones intermedias, en el primer caso, se ha utilizado un 70% de árido grande y un

30% de árido pequeño, mientras en el segundo caso se ha utilizado un 30% de árido grande y un 70% de árido pequeño.

Como se puede ver en la figura 5.1, cuando únicamente se utilizan áridos de gran tamaño quedan vacíos de dimensiones importantes. A revés, en la curva granulométrica que presenta el 100% de tamaño pequeño, queda un menor número de poros y de dimensiones menos importantes. Esto es debido al hecho que los áridos más pequeños pueden rellenar con más facilidad los huecos.

En la tabla 5.1, se presenta el contenido en porcentaje de los dos tipos de áridos utilizados por la modelización. Como se puede observar, la curva granulométrica C-1, tiene el 100% de árido grande y a medida que se llega a la curva granulométrica C-11, la cantidad de árido grande alcanza el 0%. El contenido de árido pequeño se comporta al revés, es decir contenido nulo por la curva granulométrica C-1, y 100% de árido pequeño por la curva granulométrica C-11.

Curva	Tamaño de los áridos [mm]					
	% Φ Grande (4 mm)	% Φ Pequeño (1 mm)				
R-1	100,0	0,0				
R-2	90,0	10,0				
R-3	80,0	20,0				
<b>R-4</b>	70,0	30,0				
R-5	60,0	40,0				
R-6	50,0	50,0				
R-7	40,0	60,0				
R-8	30,0	70,0				
R-9	20,0	80,0				
R-10	10,0	90,0				
<b>R-11</b>	0.0	100,0				

Tabla 5.1: Contenido en porcentaje de los diferentes áridos por cada curva granulométrica.

Con el propósito de dejar claro la división de las diferentes curvas granulométricas, se presenta la figura 5.2.



Figura 5.2: Ilustración del contenido de los diferentes áridos.

Además, las mezclas con un porcentaje más elevado de áridos pequeños, tienen una superficie de contacto mucho más elevada que mezclas con un elevado porcentaje de árido de gran tamaño. Gracias a esta propiedad física, cuando hay una mayor superficie de contacto, se producirán más contacto entre las partículas y, por lo que se ha indicado anteriormente, habrá una trasmisión de calor por conducción. Por lo tanto se piensa que las mezclas con un alto contenido de áridos pequeño alcanzarían valores de conductividad térmicas más elevadas.

Con la finalidad de estudiar el comportamiento térmico del HoPo relacionado con la composición de su mezcla, se han considerado once curvas granulométricas. Estas se han obtenido variando el contenido porcentual de los áridos. Se ha empezado con una curva granulométrica con el 100% de árido grande, disminuyendo un 10% su contenido y aumentando un 10% el contenido de árido pequeño, llegando hasta la curva granulométrica con un 0% de árido grande y 100% de árido pequeño.

# 5.2.2 Compactación

Una vez determinada el tipo de curva granulométrica, es decir, los tamaños de áridos que se utilizarán en el diseño del HoPo, es necesario determinar el grado de compactación aplicado a la probeta. Como destacado anteriormente es necesario definir el grado de compactación porqué este influye en las prestaciones del HoPo. Por ejemplo, a medida que sube el nivel de compactación, aumentan también los números de contactos entre las partículas y en consecuencia la superficie de contacto.

Como se ha comentado anteriormente, las prestaciones del HoPo disminuyen a medida que suben los contactos. Esto es debido al hecho que aumenta el calor que se transmite por conducción. Además, a medida que sube el grado de compactación disminuye el contenido de aire, obteniendo de esta manera, una masa más compacta.

En esta tesis, para tener en cuenta los fenómenos que intervienen por efecto de la compactación, se han individualizado diferentes niveles de referencia. De hecho, los modelos que salen del primer módulo (presentado en el capítulo tres), no tienen una compactación, la disposición de las partículas depende solamente de la fuerza de gravedad. Por lo tanto estos modelos, como se muestra en la figura 5.3 tienen un nivel de compactación de 0%.



Figura 5.3: Modelo de ejemplo con un grado de compactación de 0%.

En la figura 5.4 se presenta el modelo obtenido utilizando la curva granulométrica que presenta un 60% de áridos de tamaño grande y un 40% de áridos de tamaño pequeño. Como se ha comentado anteriormente, el grado de compactación que presenta este modelo es de 0%. En la realidad no se obtienen pavimentos u otros elementos sin compactar, esto se debe a que la compactación deja la mezcla más sólida y estable. Por esta razón, se ha decidido determinar el comportamiento de las simulaciones con diferentes niveles de compactación, es decir 5%, 10%, 15%, 20% y 25% cuando sea posible.



**Figura 5.4:** diferentes niveles de compactación por un modelo obtenido de la curva granulométrica con 60% de árido grande y 40% de árido pequeño

En la figura 5.4 se muestran los diferentes grados de compactación que el algoritmo presentado en el capítulo tres ha determinado para la curva granulométrica del 60%-40%. En la figura 5.4 (a) se muestra el nivel de compactación del 5%, en la figura 5.4 (b) se pasa a un grado de compactación del 10% y luego, en la figura 5.4 (c) y (d) se muestra un grado de compactación del 15% y del 20% respectivamente.

La figura 5.4 por lo tanto muestra los diferentes pasos de carga posibles con esta específica configuración de las partículas. Como se puede observar, y como se ha destacado en el estudio de la literatura, a medida que sube el grado de compactación de la probeta, suben los contactos entre las partículas y también la superficie de contacto. Además a medida que sube el nivel de compactación, disminuyen los vacíos que quedan en las probetas.

La expectativa, acuerdo con los estudios presentados en el estudio de la literatura, es obtener mejores prestaciones térmicas en los modelos con más contenido de aire, que además, son los modelos con menor superficie de contacto entre las partículas. Por lo tanto, en los modelos con una mayor compactación, se espera encontrar peores propiedades térmicas. Se debe decir que no se ha podido alcanzar en todos los modelos un grado de compactación del 25%. Esto es debido al hecho que no siempre la disposición de las partículas permite geométricamente un desplazamiento del 25% respecto a la conformación original.

# 5.3 Presentaciones de los resultados

Con el fin de obtener un número estadísticamente apropiado de simulaciones, se ha decidido calcular a través del algoritmo, veinte probetas por cada curva granulométrica. De esta manera, se obtendrán un número suficiente de resultados con el fin de limitar los errores debidos a la incertitud propia de todos los modelos experimentales. Se obtendrán un total de 220 diferentes modelos, con las diferentes compactaciones destacadas anteriormente.

Cada modelo, como mínimo tiene cuatro diferentes compactaciones, y algunos cinco. El número de modelos que se analizarán será mayor de 880 unidades. Además, por cada modelo se analizará el comportamiento de la probeta en las dos direcciones principales, es decir X e Y, por lo tanto el número de modelos analizado para permitir un correcto estudio estadístico será mayor de 1600 unidades.

En los apartados siguientes se presentarán los resultados obtenidos analizando los modelos generados anteriormente. En particular, se presentarán en primer lugar las propiedades que no dependen de la dirección del flujo de calor, es decir, los valores de calor específico ( $C_{esp}$ ), densidad ( $\rho$ ). Posteriormente, se presentarán las propiedades que dependen de la dirección del flujo de calor, precisamente los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) y de difusividad térmica (k).

### 5.3.1 Propiedades materiales utilizados por los modelos

Como se ha presentado anteriormente, el modelo que expresa el HoPo sigue el comportamiento de un material heterogéneo. Los materiales que se han considerado para la modelización son los áridos, la pasta de cemento y el aire que rellena los vacíos. Se ha decidido utilizar materiales estándares para esa simulación, para obtener mejores resultados se podrían emplear materiales con propiedades térmicas mejores, como se ha comentado anteriormente. En la tabla 5.2 se presentan los materiales que han sido utilizados para la experimentación.

	Densidad (ρ) [kg/m³]	Calor especifico (C <sub>esp</sub> ) [J/kg K]	Conductividad térmica (λ <sub>e</sub> ) [W/m K]
Árido	2500,00	908,00	2,500
Pasta de cemento	1800,00	736,00	0,955
Aire	1,225	1006,00	0,025

**Tabla 5.2:** Propiedades de los elementos utilizados por la creación de los modelos.

En los modelos, se han simulados áridos calizos, mostrados en la figura 5.5, con una densidad media de 2500 kg/m<sup>3</sup>, que corresponde a un calor especifico de 908 J/kg K y a una conductividad de 2,5 W/m K. Estos valores son característicos de áridos calizos con propiedades normales, no de alto rendimiento. Se han utilizados áridos calizos normales para dar una visión más general al trabajo y para ser desarrollado posteriormente con mejoras en el diseño de la mezcla.



Figura 5.5: Ejemplo de árido calizo.

Para simular las propiedades térmicas de la pasta de cemento se ha utilizado la normativa técnica UNI-10351, donde se presentan diferentes tipos de pastas de cemento. Para la simulación objetivo de este trabajo de tesis, se ha decidido utilizar un mortero de cal y cemento con las propiedades presentadas en la tabla 5.2.

#### 5.3.2 Densidad ( $\rho$ )

La densidad de un material se define como la cantidad de masa por unidad de volumen. Además de la definición física de densidad, se puede intuir que materiales con diferentes densidades pueden ser más o menos compactos. La diferencia entre dos materiales con diferentes valores de densidad, no solo en el aspecto exterior sino también en las propiedades internas del material. Un material con una elevada densidad, es decir muy compacto, como el plomo, tendrá propiedades térmicas peores con respecto a un material con una baja densidad como el corcho. Esto se principalmente a la estructura porosa del material y, por lo tanto a la inclusión de aire. Otro aspecto muy importante es la diferente estructura interna con menor superficie de contacto entre las partículas.

El algoritmo presentado en el capítulo tercero, tiene como datos de salida las dimensiones 2D del modelo y las superficies de los diferentes materiales que componen la probeta de HoPo. Por ejemplo, las dimensiones de la probeta por la curva granulométrica 1, es decir con el 100% de árido grande, son 4,00 cm de base (b) y 3,725 cm de altura (a). El primer modelo, además, tiene 7,414 cm<sup>2</sup> de árido (A<sub>arido</sub>) y 2,649 cm<sup>2</sup> de pasta de cemento (A<sub>pasta</sub>).

Con estos datos, es posible calcular la densidad de cada modelo. En primer lugar, se debe determinar la superficie 2D del modelo ( $S_{modelo}$ ) utilizando la ecuación 5.1. Este paso es fundamental porqué, sabiendo la superficie 2D de los áridos y de la pasta de cemento, es posible determinar el porcentaje de cada material en el modelo creado. En particular se utiliza la ecuación 5.2 para determinar el porcentaje de áridos, la ecuación 5.3 para calcular el contenido en porcentaje de pasta de cemento y al final, la ecuación 5.4 para establecer el contenido de aire en el modelo.

$$S_{modelo} = b * a \qquad [m^2] \quad (5.1)$$

$$\mathscr{N}_{arido} = \frac{A_{arido}}{b * a} * 100$$
[%] (5.2)

$$\%_{pasta} = \frac{A_{pasta}}{b*a} * 100$$
 [%] (5.3)

$$\%_{aire} = 100 - \%_{arido} - \%_{pasta}$$
 [%] (5.4)

Una vez establecidas las cantidades de porcentaje de cada componente de la mezcla de HoPo, se puede calcular fácilmente la densidad total del modelo. Con los datos que se tienen, se puede calcular sencillamente la densidad como se muestra en la ecuación 5.5. Se multiplica el porcentaje de los diferentes materiales por su densidad respectiva.

$$\rho_{tot} = (\%_{arido} * \rho_{arido}) + (\%_{pasta} * \rho_{pasta}) + (\%_{aire} * \rho_{aire}) \qquad [kg/m^3] \quad (5.5)$$

Con la ecuación 5.5, se obtiene por tanto la densidad del modelo generado. La densidad, es una propiedad que varía al variar el grado de compactación. De hecho a medida que sube el grado de compactación, disminuye el contenido de aire en la mezcla, dejando la misma más compacta. Con una mezcla más compacta, aumentará el valor de densidad del modelo. Con el fin de documentar este cambio de densidad, se ha determinado el valor de densidad para cada curva granulométrica, para cada grupo y para cada nivel de compactación.

Posteriormente, desde la tabla 5.3 a la tabla 5.13, se presentarán los resultados obtenidos para cada curva granulométrica. Las tablas siguientes destacan el diferente valor de densidad de cada grupo en cada curva granulométrica. Con el propósito de destacar la variación de densidad de cada grupo en función del grado de compactación, se presentan las gráficas desde la de figura 5.6 a 5.16, con el comportamiento general de cada curva granulométrica.

		Compacta	ción del mo	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	1564,61	1653,21	1747,34	1858,75	
G-2	1568,33	1655,12	1753,87	1864,15	1964,32
G-5	1573,04	1659,56	1756,17	1852,01	
G-7	1561,10	1650,75	1748,07	1853,08	
G-8	1574,66	1662,97	1761,78		1986,37
G-9	1581,71	1670,84	1770,62	1883,09	
G-11	1574,20	1662,78	1758,38	1869,43	
G-15	1566,76	1652,58	1748,35	1856,57	
G-17	1557,80	1664,78	1765,60	1873,38	1986,02
G-18	1583,82	1673,20	1773,27	1886,09	
G-19	1563,49	1650,61	1747,92	1854,18	1978,55
G-20	1562,75	1653,45	1653,45	1859,05	
G-27	1569,53	1657,25	1755,37	1865,85	
G-29	1567,08	1654,52	1752,31	1856,61	
G-31	1567,83	1657,48	1755,63	1866,14	
G-32	1576,96	1665,54	1764,67	1873,33	
G-34	1613,78	1698,94	1800,90	1913,05	
G-35	1577,88	1666,57	1765,82	1860,11	2001,19
G-40	1587,21	1676,98	1773,01	1877,66	
G-44	1589,04	1676,51	1779,82	1876,30	2011,17

**Tabla 5.3:** Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m<sup>3</sup> de la curva granulométrica 1 (100% - 0%).



Figura 5.6: representación de los valores de densidad ( $\rho$ ) por la curva granulométrica 1 (100% - 0%).

		Compacta	ción del mo	delo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	1535,25	1670,60	1764,37	1877,85	
G-6	1565,41	1650,75	1751,27	1858,79	
G-10	1580,69	1667,35	1761,93	1873,03	1980,59
G-15	1569,12	1654,89	1755,92	1864,03	
G-17	1566,01	1651,42	1752,01	1854,24	1975,23
G-18	1591,37	1678,04	1780,10	1885,25	2016,32
G-19	1566,18	1651,61	1752,23	1859,88	1974,82
G-25	1591,17	1679,43	1778,06	1876,68	
G-28	1588,09	1674,39	1774,59	1879,32	2009,74
G-29	1575,23	1661,67	1755,17	1869,43	1992,20
G-30	1568,01	1653,65	1754,52	1855,08	
G-31	1570,41	1656,32	1751,75	1860,30	
G-33	1566,22	1651,66	1752,28	1853,28	1976,32
G-37	1574,71	1661,10	1757,53	1871,92	
G-38	1566,82	1652,32	1751,16	1853,34	
G-39	1587,99	1676,29	1775,01	1886,08	
G-43	1582,55	1669,83	1767,30		2000,86
G-47	1586,30	1674,00	1771,55	1882,15	2001,49
<b>G-48</b>	1565,11	1652,75	1750,20	1861,32	1959,22
G-49	1584,42	1671,91	1764,86	1875,28	

**Tabla 5.4:** Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m<sup>3</sup> de la curva granulométrica 2 (90% - 10%).



Figura 5.7: representación de los valores de densidad ( $\rho$ ) por la curva granulométrica 2 (90% - 10%).

		Compacta	ción del mo	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
<b>G4</b>	1564,15	1650,34	1733,02	1857,80	1977,01
G6	1586,03	1674,63	1674,63	1885,27	
<b>G8</b>	1594,38	1685,25	1781,44	1895,67	
G11	1546,28	1632,44	1718,10	1815,93	
G16	1583,92	1672,27	1771,06	1882,28	
G17	1624,94	1713,83	1817,76	1925,04	
G19	1561,71	1645,75	1746,17	1843,05	
G20	1592,82	1679,17	1776,87	1890,28	2022,75
G24	1595,58	1682,39	1782,32	1875,89	
G26	1592,37	1681,65	1781,65	1894,24	2022,03
G31	1554,66	1641,36	1738,31	1842,68	
G32	1599,08	1691,28	1792,41	1900,05	2021,67
G35	1584,00	1672,36	1771,17	1882,40	2005,01
G36	1611,79	1703,37	1796,77	1905,77	2041,68
G40	1589,53	1678,52	1778,09	1890,21	1968,42
G42	1578,44	1670,14	1765,03	1877,65	2005,63
G43	1560,87	1648,28	1746,07	1850,61	
G50	1585,02	1673,49	1768,64	1855,54	

**Tabla 5.5:** Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m<sup>3</sup> de la curva granulométrica 3 (80% - 20%).



Figura 5.8: representación de los valores de densidad ( $\rho$ ) por la curva granulométrica 3 (80% - 20%).

	Compactación del modelo [%]					
Grupo	5	10	15	20	25	
G-1	1586,68	1673,35	1771,98	1878,87		
G-9	1587,78	1674,32	1776,53	1871,87		
G-12	1587,35	1674,73	1772,31	1878,54		
G-13	1592,35	1679,40	1776,53			
G-20	1589,47	1675,11	1773,94	1885,56		
G-21	1584,82	1671,03	1768,12	1881,42	1980,79	
G-25	1580,92	1663,84	1765,41	1869,40		
G-28	1589,56	1676,30	1773,06	1888,11		
G-34	1587,73	1672,70	1754,54			
G-35	1598,70	1686,47	1784,44	1894,51		
G-39	1583,59	1669,67	1771,30		1995,88	
G-40	1591,17	1680,17	1774,74	1879,44		
G-41	1582,10	1668,00	1769,42			
G-43	1586,81	1673,68	1770,63			
G-45	1585,24	1672,38	1769,67	1878,99		
G-46	1579,97	1665,64	1766,77	1864,42		
G-48	1591,77	1679,20	1773,65	1881,82		
G-49	1557,71	1648,59	1745,03	1848,38	1963,44	
G-50	1585,79	1673,15	1766,87	1874,29		

**Tabla 5.6:** Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m<sup>3</sup> de la curva granulométrica 4 (70% - 30%).



Figura 5.9: representación de los valores de densidad ( $\rho$ ) por la curva granulométrica 4 (70% - 30%).

	Compactación del modelo [%]					
Grupo	5	10	15	20	25	
G-2	1587,38	1674,94	1768,89	1878,45		
G-3	1572,17	1659,91	1758,03	1797,10		
<b>G-4</b>	1566,95	1651,74	1752,14	1851,23		
G-5	1529,71	1615,08	1710,55	1813,72	1917,92	
G-6	1541,34	1622,98	1725,11	1834,48		
G-7	1536,51	1622,20	1718,02	1819,85	1925,69	
G-8	1542,99	1629,42	1726,12	1832,27		
G-13	1542,29	1630,07	1719,68	1832,92	1949,08	
G-15	1535,93	1621,55	1717,29	1825,05	1899,62	
G-16	1527,51	1612,63	1707,80	1809,75	1922,16	
G-17	1533,13	1618,90	1714,83	1819,61	1910,11	
G-22	1535,26	1621,26	1717,49	1825,86	1948,85	
G-23	1541,71	1673,66	1773,47	1885,94		
G-24	1590,43	1675,95	1773,44	1883,93	1990,39	
G-27	1581,34	1669,66	1765,36	1879,64	2003,77	
G-28	1570,42	1660,37	1758,55			
G-29	1582,21	1669,80	1767,84	1880,44		
G-31	1587,42	1677,41	1772,30	1885,24	2006,35	
G-32	1569,73	1657,19	1754,98	1861,34	1989,85	
G-34	1574,76	1662,80	1757,51	1870,52		

**Tabla 5.7:** Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m<sup>3</sup> de la curva granulométrica 5 (60% - 40%).



Figura 5.10: representación de los valores de densidad ( $\rho$ ) por la curva granulométrica 5 (60% - 40%).

	Compactación del modelo [%]						
Grupo	5	10	15	20	25		
G-2	1590,23	1678,19	1768,35	1886,64	2002,75		
G-3	1587,03	1672,96	1771,72	1879,25	2006,57		
G-5	1589,38	1675,58	1777,66	1882,01			
G-6	1590,97	1677,34	1779,65	1880,66	2004,12		
G-9	1588,37	1674,45	1776,40	1884,78			
G-12	1585,55	1672,30	1766,21	1880,73			
G-13	1587,96	1674,48	1767,27	1872,57			
G-15	1581,18	1673,34	1766,95	1875,61	1977,93		
G-20	1587,65	1673,65	1773,52	1870,75			
G-22	1590,54	1676,86	1779,11	1728,17			
G-23	1588,41		1778,06	1888,66	2013,08		
G-24	1590,13	1676,90	1773,69	1889,16	2012,94		
G-25	1589,96	1672,59	1775,50	1876,43			
G-32	1584,15	1670,25	1772,25	1873,44			
G-35	1587,19	1679,60	1777,27	1880,18			
G-38	1580,03	1665,67	1767,09	1870,56			
G-40	1587,75	1671,15	1775,62				
G-42	1587,47	1671,32	1765,96				
G-49	1585,74	1671,52	1773,10	1881,07			
G-50	1586,65	1676,20	1772,91	1887,66			

**Tabla 5.8:** Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m<sup>3</sup> de la curva granulométrica 6 (50% - 50%).



Figura 5.11: representación de los valores de densidad ( $\rho$ ) por la curva granulométrica 6 (50% - 50%).

	Compactación del modelo [%]					
Grupo	5	10	15	20	25	
G-1	1589,17	1677,76	1776,82			
G-3	1586,00	1675,30	1775,26	1884,41	1998,74	
G-5	1588,72	1677,26	1776,26	1887,70	2008,44	
G-9	1585,51	1674,22	1773,45	1885,19		
G-10	1580,83	1669,00	1767,59	1872,07	1999,63	
G-11	1583,81	1672,86	1772,53	1877,00		
G-12	1585,86	1674,60	1773,88	1875,46		
G-13	1582,26	1670,59	1765,20	1879,34		
G-17	1562,15	1649,24	1743,04	1854,04	1956,86	
G-21	1581,27	1669,49	1768,14	1879,20	1997,27	
G-24	1585,91	1674,66	1773,94	1885,75	1996,80	
G-25	1587,69	1672,68	1773,55	1884,25	2008,73	
G-26	1587,99	1676,98	1773,32	1881,70		
G-27	1590,87	1681,74	1776,11	1890,51	1999,47	
G-29	1586,84	1676,79	1770,85	1884,12	2011,75	
G-31	1606,84	1698,02	1789,86	1908,25		
G-35	1587,29	1676,74	1776,89	1881,39	1996,61	
G-36	1584,77	1669,16	1772,52	1772,52		
G-37	1582,23	1671,09	1767,08	1877,62		
G-43	1586,50	1675,32	1774,68	1884,63	1993,59	

**Tabla 5.9:** Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m<sup>3</sup> de la curva granulométrica 7 (40% - 60%).



Figura 5.12: representación de los valores de densidad ( $\rho$ ) por la curva granulométrica 7 (40% - 60%).

	Compactación del modelo [%]				
Grupo	5	10	15	20	25
G-2	1586,65	1673,12	1769,57	1878,12	1873,82
G-6	1583,68	1672,78	1770,85	1883,81	
G-7	1585,71	1671,53	1769,58	1881,57	
G-8	1585,46	1671,25	1757,87	1881,21	
G-9	1584,04	1675,92	1772,70	1888,59	
G-12	1581,83	1674,05	1771,23	1876,58	
G-15	1590,41	1676,75	1773,01	1882,29	
G-16	1586,88	1672,83	1761,69	1883,22	2000,66
G-19	1588,67	1674,81	1770,85	1885,74	
G-21	1580,09	1672,44	1764,89	1865,89	
G-23	1584,29	1669,95	1771,73	1868,69	2001,63
G-24	1584,95	1670,68	1772,56	1874,15	
G-26	1584,39	1670,06	1769,32	1876,64	1975,78
G-33	1583,22	1669,14	1768,74	1881,79	
G-35	1587,60	1673,62	1775,87	1878,35	
G-36	1585,89	1678,59	1776,32	1881,71	1992,81
G-37	1587,49	1671,92	1775,75	1877,78	
G-40	1584,03	1666,85	1771,42	1879,21	
G-42	1585,10	1670,45	1768,31	1877,35	2008,22
G-44	1587,29	1673,28	1775,49	1877,85	

**Tabla 5.10:** Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m<sup>3</sup> de la curva granulométrica 8 (30% - 70%).



Figura 5.13: representación de los valores de densidad ( $\rho$ ) por la curva granulométrica 8 (30% - 70%).

	Compactación del modelo [%]				
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	1585,08	1670,23	1771,76	1874,76	
G-2	1590,28	1674,82	1775,51	1885,09	
G-3	1585,75	1674,50	1773,77	1879,57	
G-5	1586,75	1675,61	1773,18	1881,35	
G-9	1584,31	1674,11	1641,37	1880,67	
G-13	1582,24	1673,62	1772,79	1884,46	
G-15	1583,14	1672,18	1771,86	1880,30	
G-16	1569,71	1657,21	1748,79	1859,28	
G-20	1581,83	1666,69	1768,86	1880,02	
G-24	1580,89	1669,71	1768,40	1874,94	
G-26	1610,72	1696,33	1798,30	1913,31	
G-27	1584,55	1673,15	1767,55	1875,45	2010,48
G-29	1576,77	1667,21	1765,60	1869,00	
G-32	1585,07	1673,74	1772,92	1884,61	
G-34	1606,78	1704,00	1806,92	1923,07	
G-40	1585,65	1670,70	1770,10	1874,71	
G-42	1579,16	1667,15	1762,41	1871,78	
G-45	1586,49	1675,32	1774,69	1884,46	1950,58
G-49	1578,90	1671,75	1766,77	1876,18	1983,23
G-50	1590,34	1679,61	1772,53	1873,25	

**Tabla 5.11:** Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m<sup>3</sup> de la curva granulométrica 9 (20% - 80%).



Figura 5.14: representación de los valores de densidad ( $\rho$ ) por la curva granulométrica 9 (20% - 80%).

	Compactación del modelo [%]				
Grupo	5	10	15	20	25
G-5	1592,15	1678,26	1774,22	1881,82	
G-7	1589,81	1675,66	1771,31	1882,13	
G-8	1585,21	1673,19	1771,99	1878,71	2004,71
G-9	1585,65	1677,72	1774,31	1880,88	
G-13	1588,95	1675,95	1774,35	1884,48	
G-14	1584,34	1676,26	1692,71	1882,95	
G-16	1580,58	1672,71	1769,42	1874,78	
G-17	1579,63	1670,99	1766,79	1870,08	
G-18	1586,63	1679,61	1776,43	1881,95	
G-21	1587,70	1679,35	1775,43	1878,56	
G-22	1584,22	1671,34	1773,34	1879,20	
G-27	1586,82	1674,22	1771,83	1884,95	
G-29	1587,54	1669,71	1769,97	1880,23	
G-34	1589,33	1678,20	1770,91	1882,20	
G-35	1578,72	1670,63	1766,38	1870,68	
G-39	1591,55	1677,59	1773,47	1884,87	
G-44	1580,85	1674,73	1771,67	1873,18	
G-45	1578,29	1670,16	1766,56	1862,84	
G-46	1579,74	1671,11	1763,75	1878,05	
G-47	1577,43	1666,27	1756,13	1879,20	

**Tabla 5.12:** Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m<sup>3</sup> de la curva granulométrica 10 (10% - 90%).



Figura 5.15: representación de los valores de densidad ( $\rho$ ) por la curva granulométrica 10 (10% - 90%).

	Compactación del modelo [%]				
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	1581,12	1664,59	1757,15		
G-2	1581,13	1670,20	1767,09	1869,22	1994,30
G-3	1582,71	1673,02	1766,04	1874,58	
G-5	1582,94	1672,21	1772,16	1876,87	1999,59
G-6	1579,92	1667,53	1763,07	1873,76	
G-8	1586,52	1677,27	1771,86	1884,72	
G-9	1588,11	1676,60	1775,54	1884,22	
G-10	1584,11	1672,82	1772,07	1878,63	1987,49
G-12	1580,33	1663,71	1763,40	1871,43	1979,54
G-13	1586,66	1672,10	1769,69	1877,13	
G-19	1581,07	1664,52	1764,31	1867,63	1985,41
G-20	1586,58	1675,51	1775,16	1887,34	
G-24	1578,40	1669,28	1761,09	1872,90	2001,54
G-26	1579,25	1667,41	1762,87	1871,57	1992,35
G-28	1583,87	1673,10	1773,00	1872,76	
G-29	1590,01	1678,72	1777,92	1884,38	
G-35	1582,77	1671,33	1770,39	1878,08	1978,19
G-36	1580,81	1669,15	1767,94	1867,98	
G-37	1582,15	1670,64	1769,62	1881,08	
G-40	1583,16	1671,76	1770,88	1878,79	

**Tabla 5.13:** Densidad ( $\rho$ ) expresa en kg/m<sup>3</sup> de la curva granulométrica 11 (0% - 100%).



Figura 5.16: representación de los valores de densidad ( $\rho$ ) por la curva granulométrica 11 (0% - 100%).

## 5.3.3 Calor específico (Cesp)

Se define como calor específico la cantidad de calor que se necesita por unidad de masa para elevar la temperatura un gado Celsius [37]. Cada substancia tiene un calor específico como se indica en tablas, pero, no se conoce el calor específico de materiales compuestos como el HoPo. Esto se debe al hecho que el calor específico de un material compuesto depende de los calores específicos de sus componentes y por lo tanto no siempre es fácil de calcular.

Para determinar el calor especifico del HoPo, se han utilizado como datos de ingreso las propiedades de los materiales y las características del modelo comentado anteriormente. Se han utilizadas las ecuaciones presentadas anteriormente con el fin de determinar el contenido de cada material en el modelo.

El paso siguiente es calcular la masa de cada elemento en el modelo. Para hacer esto, se utilizan las propiedades de cada material, en particular, la densidad  $\rho$  expresada en kg/m<sup>3</sup> y la cantidad disponible en el modelo. Utilizando las ecuaciones 5.6, 5.7 y 5.8 es posible determinar la masa de cada material. Una vez obtenida esta propiedad, a través de la ecuación 5.9, se calcula la masa total del modelo.

$$m_{arido} = \rho_{arido} * \mathscr{Y}_{arido} * S_{ensayo}$$
 [kg] (5.6)

$$m_{pasta} = \rho_{pasta} * \mathscr{Y}_{pasta} * S_{ensayo}$$
 [kg] (5.7)

$$m_{aire} = \rho_{aire} * \%_{aire} * S_{ensayo}$$
 [kg] (5.8)

$$m_{tot} = m_{arido} + m_{pasta} + m_{aire}$$
 [kg] (5.9)

Finalmente se obtiene el valor del calor específico total del modelo ( $C_{tot}$ ) a través de la ecuación 5.10. Esto procedimiento, por tanto, permite calcular una propiedad fundamental para la determinación de la difusividad térmica de cada modelo.

$$C_{tot} = \frac{\left(m_{arido} * C_{esp-arido}\right) + \left(m_{pasta} - C_{esp-pasta}\right) + \left(m_{aire} * C_{esp-aire}\right)}{m_{tot}} \quad [kg/m^3] \quad (5.10)$$

Posteriormente, desde la tabla 5.14 a la tabla 5.24, se presentarán los resultados obtenidos por cada curva granulométrica. Las tablas siguientes destacan el diferente valor de calor específico ( $C_{tot}$ ) de cada grupo en cada curva granulométrica. Viene también indicado la variación de calor específico de cada grupo en función del grado de compactación. Además, con el propósito de dejar más claro el andamiento de los resultados obtenidos, se presentan las mismas figuras (de figura 5.17 a figura 5.27).

	Compactación del modelo [%]					
Grupo	5	10	15	20	25	
G-1	872,846	872,840	872,835	872,829		
G-2	872,845	872,840	872,834	872,829	872,824	
G-5	872,845	872,840	872,834	872,829		
G-7	872,846	872,840	872,835	872,829		
G-8	872,845	872,839	872,834	872,834	872,823	
G-9	872,844	872,839	872,833	872,828		
G-11	872,845	872,839	872,834	872,829		
G-15	872,845	872,840	872,835	872,829		
G-17	872,845	872,839	872,834	872,828	872,823	
G-18	872,844	872,839	872,833	872,828		
G-19	872,846	872,840	872,835	872,829	872,824	
G-20	872,846	872,840	872,840	872,829		
G-27	872,845	872,840	872,834	872,829		
G-29	872,845	872,840	872,834	872,829		
G-31	872,845	872,840	872,834	872,829		
G-32	872,845	872,839	872,834	872,828		
G-34	872,842	872,837	872,832	872,827		
G-35	872,845	872,839	872,834	872,829	872,823	
G-40	872,844	872,839	872,833	872,828		
G-44	872,844	872,839	872,833	872,828	872,822	

Tabla 5.14: Calor específico (Ctot) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 1 (100% - 0%).



Figura 5.17: representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva granulométrica 1 (100%-0%).

	Compactación del modelo [%]					
Grupo	5	10	15	20	25	
G-1	872,848	872,839	872,834	872,828		
G-6	872,846	872,840	872,834	872,829		
G-10	872,845	872,839	872,834	872,834	872,824	
G-15	872,845	872,840	872,834	872,829		
G-17	872,845	872,840	872,834	872,829	872,824	
G-18	872,844	872,839	872,833	872,828	872,822	
G-19	872,845	872,840	872,834	872,829	872,824	
G-25	872,844	872,838	872,833	872,828		
G-28	872,844	872,839	872,833	872,828	872,822	
G-29	872,845	872,839	872,834	872,829	872,823	
G-30	872,845	872,840	872,834	872,829		
G-31	872,845	872,840	872,834	872,829		
G-33	872,845	872,840	872,834	872,829	872,824	
G-37	872,845	872,840	872,834	872,828		
G-38	872,845	872,840	872,834	872,829		
G-39	872,844	872,839	872,833	872,828		
G-43	872,844	872,839	872,834		872,823	
G-47	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823	
G-48	872,846	872,840	872,835	872,829	872,825	
G-49	872,844	872,839	872,834	872,828		

Tabla 5.15: Calor específico (Ctot) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 2 (90% - 10%).



**Figura 5.18:** representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva granulométrica 2 (90%-10%).
		Compac	tación del mo	delo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-4	872,846	872,840	872,835	872,829	872,824
G-6	872,844	872,839	872,839	872,828	
G-8	872,844	872,838	872,833	872,827	
G-11	872,847	872,841	872,836	872,831	
G-16	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-17	872,842	872,837	872,831	872,826	
G-19	872,846	872,840	872,835	872,830	
G-20	872,844	872,838	872,833	872,828	872,822
G-24	872,844	872,838	872,833	872,828	
G-26	872,844	872,838	872,833	872,827	872,822
G-31	872,846	872,841	872,835	872,830	
G-32	872,843	872,838	872,832	872,827	872,822
G-35	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
G-36	872,843	872,837	872,832	872,827	872,821
G-40	872,844	872,839	872,833	872,828	872,824
G-42	872,845	872,839	872,834	872,828	872,823
G-43	872,846	872,840	872,835	872,829	
G-50	872,844	872,839	872,834	872,829	

Tabla 5.16: Calor específico (Ctot) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 3 (80% - 20%).



Figura 5.19: representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva granulométrica 3 (80%-20%).

		Compac	tación del mo	delo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-9	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-12	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-13	872,844	872,838	872,833		
G-20	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-21	872,844	872,839	872,834	872,828	872,824
G-25	872,845	872,839	872,834	872,829	
G-28	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-34	872,844	872,839	872,834		
G-35	872,843	872,838	872,833	872,827	
G-39	872,844	872,839	872,833		872,823
G-40	872,844	872,838	872,833	872,828	
G-41	872,844	872,839	872,834		
G-43	872,844	872,839	872,833		
G-45	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-46	872,845	872,839	872,834	872,829	
<b>G-48</b>	872,844	872,838	872,833	872,828	
G-49	872,846	872,840	872,835	872,830	872,824
G-50	872,844	872,839	872,834	872,828	

Tabla 5.17: Calor específico (Ctot) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 4 (70% - 30%).



**Figura 5.20:** representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva granulométrica 4 (70%-30%).

		Compac	tación del mo	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G2	872,844	872,839	872,834	872,828	
G3	872,845	872,840	872,834	872,832	
<b>G4</b>	872,845	872,840	872,834	872,829	
G5	872,848	872,842	872,837	872,831	872,826
<b>G6</b>	872,847	872,842	872,836	872,830	
<b>G7</b>	872,847	872,842	872,836	872,831	872,826
<b>G8</b>	872,847	872,841	872,836	872,830	
G13	872,847	872,841	872,836	872,830	872,825
G15	872,848	872,842	872,836	872,831	872,827
G16	872,848	872,842	872,837	872,831	872,826
G17	872,848	872,842	872,836	872,831	872,827
G22	872,848	872,842	872,836	872,831	872,825
G23	872,847	872,839	872,833	872,828	
G24	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
G27	872,844	872,839	872,834	872,828	872,823
G28	872,845	872,840	872,834		
G29	872,844	872,839	872,834	872,828	
G31	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
G32	872,845	872,840	872,834	872,829	872,823
G34	872,845	872,839	872,834	872,829	

Tabla 5.18: Calor específico (Ctot) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 5 (60% - 40%).





		Compac	tación del mo	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-2	872,844	872,839	872,834	872,828	872,823
G-3	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
G-5	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-6	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
G-9	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-12	872,844	872,839	872,834	872,828	
G-13	872,844	872,839	872,834	872,828	
G-15	872,845	872,839	872,834	872,828	872,824
G-20	872,844	872,839	872,833	872,829	
G-22	872,844	872,839	872,833	872,836	
G-23	872,844		872,833	872,828	872,822
G-24	872,844	872,839	872,833	872,828	872,822
G-25	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-32	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-35	872,844	872,838	872,833	872,828	
G-38	872,845	872,839	872,834	872,829	
G-40	872,844	872,839	872,833		
G-42	872,844	872,839	872,834		
G-49	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-50	872,844	872,839	872,833	872,828	

Tabla 5.19: Calor específico (Ctot) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 6 (50% - 50%).



**Figura 5.22:** representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva granulométrica 6 (50%-50%).

		Compac	tación del mo	delo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	872,844	872,839	872,833		
G-3	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
G-5	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
G-9	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-10	872,845	872,839	872,834	872,828	872,823
G-11	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-12	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-13	872,844	872,839	872,834	872,828	
G-17	872,846	872,840	872,835	872,829	872,825
G-21	872,844	872,839	872,834	872,828	872,823
G-24	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
G-25	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
G-26	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-27	872,844	872,838	872,833	872,828	872,823
G-29	872,844	872,839	872,833	872,828	872,822
G-31	872,843	872,837	872,832	872,827	
G-35	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
G-36	872,844	872,839	872,833	872,833	
G-37	872,844	872,839	872,834	872,828	
G-43	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823

Tabla 5.20: Calor específico (Ctot) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 7 (40% - 60%).



**Figura 5.23:** representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva granulométrica 7 (40%-60%).

	Compactación del modelo [%]						
Grupo	5	10	15	20	25		
G-2	872,844	872,839	872,834	872,828	872,828		
G-6	872,844	872,839	872,833	872,828			
G-7	872,844	872,839	872,834	872,828			
G-8	872,844	872,839	872,834	872,828			
G-9	872,844	872,839	872,833	872,828			
G-12	872,844	872,839	872,833	872,828			
G-15	872,844	872,839	872,833	872,828			
G-16	872,844	872,839	872,834	872,828	872,823		
G-19	872,844	872,839	872,833	872,828			
G-21	872,845	872,839	872,834	872,829			
G-23	872,844	872,839	872,833	872,829	872,823		
G-24	872,844	872,839	872,833	872,828			
G-26	872,844	872,839	872,834	872,828	872,824		
G-33	872,844	872,839	872,834	872,828			
G-35	872,844	872,839	872,833	872,828			
G-36	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823		
G-37	872,844	872,839	872,833	872,828			
G-40	872,844	872,839	872,833	872,828			
G-42	872,844	872,839	872,834	872,828	872,823		
G-44	872,844	872,839	872,833	872,828			

Tabla 5.21: Calor específico (Ctot) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 8 (30% - 70%).



**Figura 5.24:** representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva granulométrica 8 (30%-70%).

		Compac	tación del mo	delo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-2	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-3	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-5	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-9	872,844	872,839	872,841	872,828	
G-13	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-15	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-16	872,845	872,840	872,835	872,829	
G-20	872,844	872,839	872,834	872,828	
G-24	872,845	872,839	872,834	872,828	
G-26	872,843	872,837	872,832	872,827	
G-27	872,844	872,839	872,834	872,828	872,822
G-29	872,845	872,839	872,834	872,829	
G-32	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-34	872,843	872,837	872,832	872,826	
G-40	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-42	872,845	872,839	872,834	872,828	
G-45	872,844	872,839	872,833	872,828	872,825
G-49	872,845	872,839	872,834	872,828	872,824
G-50	872,844	872,838	872,833	872,828	

Tabla 5.22: Calor específico (Ctot) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 9 (20% - 80%).



Figura 5.25: representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva granulométrica 9 (20%-80%).

		Compac	tación del mo	delo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-5	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-7	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-8	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
G-9	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-13	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-14	872,844	872,839	872,838	872,828	
G-16	872,845	872,839	872,834	872,828	
G-17	872,845	872,839	872,834	872,829	
G-18	872,844	872,838	872,833	872,828	
G-21	872,844	872,838	872,833	872,828	
G-22	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-27	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-29	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-34	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-35	872,845	872,839	872,834	872,829	
G-39	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-44	872,845	872,839	872,833	872,828	
G-45	872,845	872,839	872,834	872,829	
G-46	872,845	872,839	872,834	872,828	
G-47	872,845	872,839	872,834	872,828	

Tabla 5.23: Calor específico (Ctot) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 10 (10% - 90%).



Figura 5.26: representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva granulométrica 10 (10%-90%).

		Compac	tación del mo	delo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	872,845	872,839	872,834		
G-2	872,844	872,839	872,834	872,829	872,823
G-3	872,844	872,839	872,834	872,828	
G-5	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
G-6	872,845	872,839	872,834	872,828	
G-8	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-9	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-10	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
G-12	872,845	872,839	872,834	872,829	872,824
G-13	872,844	872,839	872,834	872,828	
G-19	872,845	872,839	872,834	872,829	872,824
G-20	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-24	872,845	872,839	872,834	872,828	872,823
G-26	872,845	872,839	872,834	872,829	872,823
G-28	872,637	872,632	872,626	872,621	
G-29	872,844	872,839	872,833	872,828	
G-35	872,844	872,839	872,834	872,828	872,824
G-36	872,845	872,839	872,834	872,829	
G-37	872,844	872,839	872,834	872,828	
G-40	872,844	872,839	872,833	872,828	

Tabla 5.24: Calor específico (Ctot) expresa en J/kgK de la curva granulométrica 11 (0% - 100%).



Figura 5.27: representación de los valores de calor especifico (Ct) por la curva granulométrica 11 (0%-100%).

## 5.3.4 Conductividad térmica ( $\lambda_e$ )

La conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) es la propiedad física de cualquier material que mide la capacidad de conducción del calor a través del mismo [38]. La magnitud, al revés, es la inversa de la conductividad térmica y se define como la resistencia térmica, es decir la capacidad de los materiales de oponerse al paso del calor. Por lo tanto, la conductividad térmica representa el parámetro más importante para un material que debe haber un comportamiento aislante. Como se muestra en la figura 5.28, los materiales tienen valores de conductividad muy diferentes entre ellos, para ser considerado un material aislante, este valor debe ser muy bajo.



Figura 5.28: Valores de conductividad térmica de los principales materiales.

La figura 5.28 muestra las diferentes propiedades térmicas de algunos de los principales materiales utilizados en la construcción. Como se puede ver en la figura 5.28, la conductividad térmica es una capacidad elevada en los metales y en general en cuerpos continuos, y es más baja en los gases, siendo muy baja en algunos materiales especiales tales como la fibra de vidrio, denominados por ello, aislantes térmicos. Además, para generar la conducción térmica se necesita una sustancia, por tal razón, es nula en el vacío.

El coeficiente de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) caracteriza la cantidad de calor necesario por m<sup>2</sup>, para que atravesando durante una unidad de tiempo 1 m de material se

obtenga una diferencia de 1 °C de temperatura entre las dos caras. Segundo Fourier, la relación entre el calor transportado por unidad de tiempo  $\left(\frac{dQ}{dt} \circ \text{flujo de calor } Q\right)$  y el gradiente de temperatura  $\left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)$  a través de un área A (el área a través de la cual el calor fluye perpendicularmente a un ritmo estacionario) está descrita por la ecuación 5.11 de la conductividad térmica. En la ecuación 5.12 se destaca el flujo de calor que pasa a través del material sin considerar su superficie.

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = -\lambda_e * A * \frac{T_2 - T_1}{\Delta x}$$
(5.11)

$$\dot{q} = -\lambda_e * \frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{5.12}$$

La Conductividad Térmica es, por consiguiente, una propiedad específica de cada material usada para caracterizar el transporte de calor a un ritmo estacionario. Se puede calcular usando la ecuación 5.13. Donde se indica con  $\rho(T)$  la densidad del material a una específica temperatura, con  $C_p(T)$  el color especifico a la misma temperatura y con  $\alpha(T)$  la difusividad térmica del modelo.

$$\lambda_e = \rho(T) * C_p(T) * \alpha(T) \qquad [W/mK] \quad (5.13)$$

En este trabajo de tesis, para determinar el valor de conductividad térmica, se ha utilizado el proceso descrito en el capítulo 4, el cual utiliza el software Ansys®. Antes de todo se han impuestos las temperaturas superficiales de las dos caras del modelo. Como se puede ver en la figura 5.29, se han estudiado los modelos en las dos direcciones principales, X e Y. Esto se debe al hecho que el HoPo no es un material homogéneo y por lo tanto las propiedades térmicas dependen de la dirección del flujo de calor y de la distribución interna de las partículas en el material.



Figura 5.29: esquema de calentamiento de los modelos.

Como se observa en la figura 5.7 cada modelo, determinado como se ha descrito anteriormente, viene analizado según las dos direcciones principales. En un primer caso, figura 5.29 (a), se impone a la cara superior con una temperatura de 20°C y la cara inferior presenta una temperatura de 0°C. Posteriormente, figura 5.29 (b), se impone a la cara derecha con una temperatura de 20°C y la cara izquierda tendrá una temperatura de 0°C. De esta manera se obtendrán dos valores de conductividad térmica para cada modelo.

Los datos de salida del Ansys $\mathbb{B}$  son los valores del flujo térmico de cada nodo interno del modelo. Por lo tanto, como se describe en la ecuación 5.14, se calcula el flujo térmico total (Q) del modelo en la dirección considerada. El paso siguiente, como se muestra en la ecuación 5.15, es dividir el flujo térmico total (Q) por los numero de nodos presentes en el modelo, otro dato de salida del Ansys $\mathbb{R}$ , obteniendo ( $\dot{q}$ ).

$$Q = \sum_{i=1}^{n} q_i \qquad [W/m^2] \qquad (5.14)$$
$$\dot{q} = \frac{Q}{n^\circ \, de \, nodos} \qquad [W/m^2] \qquad (5.15)$$

Para determinar la conductividad térmica del material son necesarios dos datos más. El primero es la altura del modelo en la dirección del flujo de calor, este es un dato de salida del programa de compactación descrito en el capítulo 3. Es necesario además, saber la variación de temperatura entre las dos caras del modelo (Y o X a segunda de la dirección considerada). Con el propósito de simular un comportamiento con condiciones verdaderas, se ha utilizado un intervalo térmico de  $\Delta T = 20^{\circ}C$ . Con estas consideraciones es posible calcular el valor de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) de cada modelo en las dos direcciones principales a través de la ecuación 5.16.

$$\lambda_e = \dot{q} * \frac{h}{\Delta T} \qquad [W/mK] \quad (5.16)$$

Donde h indica la altura del modelo en la dirección considerada, es decir en dirección Y o X. Con estas consideraciones se han calculado los valores de conductividad buscados. Posteriormente, para cada curva granulométrica, se presentaran las tablas (de tabla 5.25 a tabla 5.46) con los valores determinados y también algunas imágenes de los modelo con la distribución de la temperatura en la dirección considerada. Como se indica anteriormente, cada curva granulométrica, tiene veinte grupos con diferentes grados de compactación. Para simplificar la lectura de los datos tabulados, se adjuntan también cuatro imágenes de distribución de la temperatura por cada curva granulométrica.

Para evaluar correctamente la distribución de las temperaturas en el modelo se debe utilizar una escala de referencia. Se ha decidido utilizar la escala mostrada en la figura 5.30 para todos los modelos. Es decir, cada imagen que se presentará posteriormente, se podrá leer con una única escala. Los valores que pueden asumir los modelos son desde 0°C en azul, hasta 20°C en rojo.



Figura 5.30: escala de referencia para la lectura de los valores de temperatura en los modelos.

	Compactación del modelo [%]						
Grupo	5	10	15	20	25		
G-1	0,585	0,671	0,774	0,943			
G-2	0,638	0,821	0,912	0,973	0,899		
G-5	0,714	0,780	0,856	0,817			
G-7	0,534	0,681	0,818	0,845			
G-8	0,629	0,722	0,865	0,940	0,998		
G-9	0,536	0,760	0,828	0,935			
G-11	0,643	0,748	0,744	0,813			
G-15	0,645	0,756	0,872	0,824			
G-17	0,723	0,809	0,891	0,986	0,994		
G-18	0,753	0,797	0,867	0,924			
G-19	0,567	0,707	0,791	0,792	0,913		
G-20	0,522	0,687	0,801	0,902			
G-27	0,659	0,748	0,834	0,931			
G-29	0,456	0,685	0,794	0,790			
G-31	0,572	0,737	0,819	0,927			
G-32	0,550	0,802	0,889	0,876			
G-34	0,730	0,726	0,701	0,894			
G-35	0,611	0,702	0,798	0,842	1,101		
G-40	0,696	0,752	0,738	0,823			
G-44	0,652	0,630	0,779	0,771	0,981		

**Tabla 5.25:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 1<br/>(100% - 0%) en dirección Y.



Figura 5.31: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 1 (100%-0%) en dirección Y.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	0,587	0,684	0,805	0,911	
G-2	0,541	0,686	0,820	1,018	1,215
G-5	0,578	0,702	0,812	1,018	
G-7	0,551	0,758	0,852	0,986	
G-8	0,610	0,738	0,833	1,011	1,230
G-9	0,573	0,740	0,901	1,085	
G-11	0,571	0,678	0,868	1,057	
G-15	0,581	0,689	0,788	0,972	
G-17	0,522	0,790	0,954	1,086	1,217
G-18	0,596	0,747	0,947	1,096	
G-19	0,460	0,587	0,756	0,904	1,097
G-20	0,579	0,762	0,892	1,109	
G-27	0,553	0,727	0,868	1,023	
G-29	0,548	0,659	0,784	1,005	
G-31	0,587	0,750	0,827	0,979	
G-32	0,587	0,683	0,833	1,038	
G-34	0,624	0,715	0,802	1,003	
G-35	0,558	0,695	0,829	0,943	1,147
G-40	0,433	0,530	0,688	0,846	
G-44	0.629	0 712	0849	0 990	1 2 3 2

**Tabla 5.26:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 1<br/>(100% - 0%) en dirección X.



Figura 5.32: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 1 (100%-0%) en dirección X.



		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	0,625	0,735	0,725	0,955	
G-6	0,642	0,702	0,812	0,960	
G-10	0,722	0,808	0,848	0,856	0,818
G-15	0,551	0,642	0,724	0,869	
G-17	0,626	0,696	0,797	0,780	0,920
G-18	0,646	0,755	0,877	0,914	1,078
G-19	0,587	0,673	0,803	0,892	1,092
G-25	0,580	0,672	0,788	0,866	
G-28	0,551	0,702	0,807	0,858	0,990
G-29	0,650	0,779	0,752	0,882	1,031
G-30	0,606	0,726	0,791	0,707	
G-31	0,640	0,746	0,840	0,903	
G-33	0,574	0,687	0,762	0,760	0,921
G-37	0,599	0,747	0,843	1,012	
G-38	0,584	0,671	0,716	0,902	
G-39	0,618	0,722	0,855	0,980	
G-43	0,596	0,693	0,826		1,152
G-47	0,614	0,694	0,783	0,994	1,079
<b>G-48</b>	0,534	0,688	0,713	0,904	0,801
6-49	0 596	0.689	0 707	0.830	

**Tabla 5.27:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 2<br/>(90% - 10%) en dirección Y.



Figura 5.34: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 2 (90%-10%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]							
Grupo	5	10	15	20	25			
G-1	0,531	0,618	0,733	0,905				
G-6	0,602	0,694	0,810	0,925				
G-10	0,465	0,563	0,642	0,844	1,208			
G-15	0,559	0,674	0,831	1,002				
G-17	0,524	0,644	0,838	1,026	1,252			
G-18	0,621	0,729	0,844	1,006	1,239			
G-19	0,517	0,633	0,767	0,920	1,095			
G-25	0,628	0,755	0,986	1,071				
G-28	0,530	0,638	0,813	0,970	1,111			
G-29	0,525	0,608	0,820	0,903	1,124			
G-30	0,543	0,676	0,817	0,873				
G-31	0,574	0,636	0,751	0,934				
G-33	0,508	0,602	0,786	0,886	1,083			
G-37	0,622	0,731	0,879	1,052				
G-38	0,598	0,695	0,816	0,934				
G-39	0,562	0,643	0,756	0,952				
G-43	0,609	0,707	0,834		1,172			
G-47	0,587	0,770	0,891	1,074	1,177			
<b>G-48</b>	0,666	0,756	0,881	1,014	1,149			
G-49	0,564	0,708	0,792	0,962				

**Tabla 5.28:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 2<br/>(90% - 10%) en dirección X.



**Figura 5.35:** representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 2 (90%-10%) en dirección X.







Dirección Y - Compactación 10%



Dirección Y - Compactación 20%



Dirección X - Compactación 10%



Dirección X - Compactación 20%

**Figura 5.36:** Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo G-6 de la curva granulométrica 2 (90% - 10%), con diferentes grados de compactación.

	Compactación del modelo [%]						
Grupo	5	10	15	20	25		
G-4	0,580	0,670	0,797	0,908	0,975		
G-6	0,546	0,670	0,752	0,957			
G-8	0,620	0,754	0,872	1,028			
G-11	0,540	0,702	0,777	0,774			
G-16	0,558	0,670	0,825	0,953			
G-17	0,590	0,682	0,762	0,805			
G-19	0,483	0,657	0,892	0,792			
G-20	0,593	0,603	0,700	0,864	1,208		
G-24	0,590	0,617	0,719	0,824			
G-26	0,613	0,727	0,856	0,997	1,130		
G-31	0,539	0,656	0,774	0,824			
G-32	0,576	0,717	0,815	0,937	0,913		
G-35	0,558	0,726	0,845	1,008	0,976		
G-36	0,614	0,687	0,672	0,680	1,043		
G-40	0,568	0,730	0,847	1,040	0,722		
G-42	0,568	0,694	0,800	0,940	1,181		
G-43	0,579	0,707	0,782	0,771			
G-50	0,599	0,722	0,773	0,713			

**Tabla 5.29:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 3<br/>(80% - 20%) en dirección Y.



Figura 5.37: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 3 (80%-20%) en dirección Y.

		Compacta	nián dol mo	dala [04]	
		Compactat	lon del mo		
Grupo	5	10	15	20	25
G-4	0,622	0,702	0,816	0,906	1,016
G-6	0,535	0,637	0,742	0,902	
G-8	0,539	0,698	0,801	0,950	
G-11	0,560	0,693	0,780	0,870	
G-16	0,554	0,698	0,882	0,987	
G-17	0,546	0,647	0,784	0,931	
G-19	0,564	0,677	0,862	0,946	
G-20	0,553	0,628	0,751	0,893	1,105
G-24	0,595	0,688	0,816	0,905	
G-26	0,587	0,667	0,802	0,938	1,137
G-31	0,643	0,818	0,917	1,062	
G-32	0,589	0,696	0,804	0,967	1,067
G-35	0,588	0,707	0,824	0,987	1,158
G-36	0,621	0,752	0,876	0,979	1,164
G-40	0,544	0,630	0,838	1,026	1,178
G-42	0,542	0,667	0,787	0,984	1,167
G-43	0,570	0,672	0,823	0,974	
G-50	0,632	0,691	0,824	0,952	

**Tabla 5.30:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 3<br/>(80% - 20%) en dirección X.



Figura 5.38: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 3 (80%-20%) en dirección X.





		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	0,645	0,812	0,746	0,933	
G-9	0,691	0,808	0,941	0,805	
G-12	0,641	0,743	0,878	0,833	
G-13	0,677	0,780	0,858		
G-20	0,673	0,755	0,852	0,904	
G-21	0,619	0,755	0,800	1,057	0,969
G-25	0,668	0,664	0,817	0,832	
G-28	0,596	0,730	0,872	1,000	
G-34	0,638	0,719	0,706		
G-35	0,582	0,691	0,848	1,006	
G-39	0,659	0,775	0,819		1,009
G-40	0,587	0,712	0,728	0,786	
G-41	0,625	0,686	0,796		
G-43	0,644	0,744	0,912		
G-45	0,562	0,682	0,790	0,962	
G-46	0,578	0,675	0,750	0,717	
<b>G-48</b>	0,647	0,704	0,771	0,820	
G-49	0,556	0,624	0,701	0,712	0,959
G-50	0.673	0.783	0.818	0.915	

**Tabla 5.31:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 4<br/>(70% - 30%) en dirección Y.



Figura 5.40: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 4 (70%-30%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]							
Grupo	5	10	15	20	25			
G-1	0.620	0.750	0.868	1.000	_0			
G-9	0.582	0.659	0.803	0.954				
G-12	0,669	0,752	0,875	0,990				
G-13	0.567	0.653	0.732	-,				
G-20	0.533	0.655	0.771	0.928				
G-21	0,551	0,652	0,788	0,935	1,082			
G-25	0,621	0,752	0,821	1,038				
G-28	0,658	0,751	0,874	1,006				
G-34	0,617	0,779	0,855	,				
G-35	0,647	0,695	0,840	1,021				
G-39	0,587	0,644	0,750		1,153			
G-40	0,606	0,719	0,863	1,041				
G-41	0,587	0,693	0,844					
G-43	0,603	0,707	0,794					
G-45	0,675	0,764	0,843	0,928				
G-46	0,616	0,663	0,765	0,879				
G-48	0,664	0,774	0,895	1,060				
G-49	0,592	0,674	0,867	0,966	1,142			
G-50	0.592	0.714	0.801	0.920				





**Figura 5.41:** representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 4 (70%-30%) en dirección X.



**Figura 5.42:** Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo G-45 de la curva granulométrica 4 (70% - 30%), con diferentes grados de compactación.

	Compactación del modelo [%]							
Grupo	5	10	15	20	25			
G-2	0,686	0,714	0,766	0,790				
G-3	0,641	0,784	0,909	0,582				
G-4	0,673	0,706	0,803	0,882				
G-5	0,585	0,744	0,860	0,858	0,911			
G-6	0,613	0,729	0,826	1,027				
G-7	0,617	0,776	0,913	0,802	0,924			
G-8	0,625	0,752	0,838	0,924				
G-13	0,627	0,703	0,711	0,955	0,937			
G-15	0,640	0,760	0,859	0,947	0,713			
G-16	0,626	0,768	0,895	0,870	0,915			
G-17	0,597	0,740	0,866	0,873	0,877			
G-22	0,584	0,751	0,869	0,992	1,260			
G-23	0,574	0,660	0,830	0,988				
G-24	0,633	0,747	0,773	0,866	0,897			
G-27	0,634	0,768	0,767	0,964	1,136			
G-28	0,571	0,742	0,891					
G-29	0,537	0,647	0,694	0,834				
G-31	0,609	0,684	0,795	0,992	0,982			
G-32	0,523	0,625	0,805	0,926	1,187			
G-34	0,624	0,701	0,739	0,955				

**Tabla 5.33:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 5<br/>(60% - 40%) en dirección Y.



Figura 5.43: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 5 (60%-40%) en dirección Y.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-2	0,640	0,749	0,843	1,000	
G-3	0,585	0,663	0,804	0,972	
G-4	0,556	0,670	0,808	0,956	
G-5	0,600	0,690	0,839	0,985	1,186
G-6	0,567	0,679	0,768	0,980	
G-7	0,607	0,703	0,846	0,969	1,153
G-8	0,580	0,691	0,825	0,935	
G-13	0,570	0,720	0,832	1,009	1,229
G-15	0,670	0,781	0,937	1,001	1,184
G-16	0,539	0,660	0,809	0,981	1,143
G-17	0,481	0,619	0,733	0,935	1,111
G-22	0,515	0,625	0,768	0,953	1,271
G-23	0,620	0,686	0,792	0,934	
G-24	0,630	0,717	0,815	0,990	1,189
G-27	0,640	0,747	0,884	1,016	1,192
G-28	0,559	0,677	0,797		
G-29	0,624	0,717	0,846	0,999	
G-31	0,580	0,652	0,775	0,992	1,199
G-32	0,505	0,592	0,731	0,895	1,074
G-34	0.566	0.671	0.831	0 933	

**Tabla 5.34:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 5<br/>(60% - 40%) en dirección X.



**Figura 5.44:** representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 5 (60%-40%) en dirección X.





		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-2	0,675	0,823	0,763	0,901	1,003
G-3	0,659	0,741	0,782	0,902	1,054
G-5	0,550	0,702	0,813	0,860	
G-6	0,613	0,767	0,843	0,853	1,008
G-9	0,663	0,849	0,951	1,059	
G-12	0,601	0,767	0,774	0,874	
G-13	0,624	0,743	0,751	0,940	
G-15	0,573	0,689	0,699	0,829	0,765
G-20	0,642	0,778	0,818	0,742	
G-22	0,605	0,767	0,861		
G-23	0,645		0,934	1,039	1,187
G-24	0,649	0,758	0,894	1,074	1,224
G-25	0,615	0,698	0,804	0,873	
G-32	0,631	0,736	0,910	0,858	
G-35	0,670	0,810	0,928	1,038	
G-38	0,499	0,641	0,887	0,909	
G-40	0,582	0,643	0,859		
G-42	0,584	0,634	0,733		
G-49	0,671	0,796	0,855	1,050	
G-50	0.578	0 771	0 927	1 0 4 9	

**Tabla 5.35:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 6<br/>(50% - 50%) en dirección Y.



Figura 5.46: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 6 (50%-50%) en dirección Y.

		Compactación del modelo [%]							
	5	10	15	20	25				
G-2	0,551	0,696	0,855	1,046	1,198				
G-3	0,609	0,723	0,827	0,954	1,125				
G-5	0,603	0,726	0,841	1,066					
G-6	0,599	0,746	0,855	0,934	1,186				
G-9	0,573	0,678	0,834	0,971					
G-12	0,632	0,699	0,789	0,954					
G-13	0,616	0,720	0,825	0,979					
G-15	0,616	0,729	0,829	0,951	1,146				
G-20	0,619	0,728	0,879	1,037					
G-22	0,515	0,623	0,772						
G-23	0,563		0,883	1,011	1,172				
G-24	0,632	0,765	0,903	1,055	1,217				
G-25	0,587	0,723	0,868	0,968					
G-32	0,587	0,673	0,836	0,972					
G-35	0,658	0,754	0,868	1,014					
G-38	0,582	0,686	0,799	0,931					
G-40	0,607	0,697	0,857						
G-42	0,565	0,715	0,901						
G-49	0,601	0,699	0,826	1,028					
G-50	0,605	0,717	0,816	1,008					

Tabla 5.36: Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 6<br/>(50% - 50%) en dirección X.



**Figura 5.47:** representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 6 (50%-50%) en dirección X.



**Figura 5.48:** Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo G-9 de la curva granulométrica 6 (50% - 50%), con diferentes grados de compactación.

	Compactación del modelo [%]							
Grupo	5	10	15	20	25			
G-1	0,677	0,834	0,956					
G-3	0,636	0,778	0,869	0,848	0,890			
G-5	0,615	0,779	0,897	1,066	1,076			
G-9	0,669	0,772	0,897	1,070				
G-10	0,641	0,788	0,891	0,855	1,097			
G-11	0,550	0,663	0,809	0,834				
G-12	0,680	0,783	0,876	0,837				
G-13	0,679	0,795	0,786	0,986				
G-17	0,649	0,764	0,729	0,966	0,922			
G-21	0,667	0,767	0,862	0,990	1,193			
G-24	0,702	0,785	0,876	0,993	1,202			
G-25	0,651	0,767	0,855	0,874	1,163			
G-26	0,652	0,748	0,818	1,094				
G-27	0,654	0,746	0,795	0,932	0,869			
G-29	0,710	0,798	0,864	0,978	1,141			
G-31	0,688	0,791	0,771	1,035				
G-35	0,641	0,779	0,913	1,027	1,042			
G-36	0,678	0,684	0,880	1,021				
G-37	0,654	0,764	0,742	0,827				
G-43	0,571	0,659	0,872	0,967	1,032			

**Tabla 5.37:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 7<br/>(40% - 60%) en dirección Y.



Figura 5.49: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 7 (40%-60%) en dirección Y.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	0,649	0,737	0,889		
G-3	0,595	0,714	0,886	1,029	1,165
G-5	0,597	0,731	0,852	1,028	1,167
G-9	0,565	0,655	0,788	0,954	
G-10	0,659	0,778	0,896	1,021	1,231
G-11	0,614	0,731	0,856	1,013	
G-12	0,554	0,709	0,861	1,104	
G-13	0,598	0,679	0,782	0,950	
G-17	0,604	0,737	0,815	0,951	1,116
G-21	0,526	0,678	0,795	0,922	1,052
G-24	0,576	0,674	0,807	0,842	1,041
G-25	0,592	0,709	0,802	0,997	1,187
G-26	0,629	0,753	0,903	1,018	
G-27	0,660	0,779	0,860	0,958	1,170
G-29	0,688	0,782	0,928	1,075	1,204
G-31	0,474	0,594	0,697	0,940	
G-35	0,601	0,690	0,858	0,996	1,173
G-36	0,652	0,749	0,844	0,936	
G-37	0,628	0,736	0,854	0,997	
G-43	0.688	0 742	0.869	1 0 2 4	1 2 1 0

**Tabla 5.38:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 7<br/>(40% - 60%) en dirección X.



Figura 5.50: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 7 (40%-60%) en dirección X.





		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-2	0,723	0,822	0,882	0,894	0,588
G-6	0,714	0,745	0,910	0,915	
G-7	0,649	0,767	0,752	0,994	
G-8	0,676	0,777	0,799	0,984	
G-9	0,641	0,744	0,883	1,033	
G-12	0,747	0,839	0,958	0,893	
G-15	0,696	0,794	0,944	0,915	
G-16	0,670	0,749	0,598	1,012	0,982
G-19	0,717	0,803	0,933	1,117	
G-21	0,634	0,697	0,697	0,817	
G-23	0,700	0,778	0,842	0,738	0,942
G-24	0,671	0,732	0,837	0,845	
G-26	0,653	0,759	0,808	0,909	1,008
G-33	0,645	0,722	0,878	0,981	
G-35	0,601	0,703	0,835	0,808	
G-36	0,670	0,751	0,866	0,831	0,914
G-37	0,643	0,720	0,837	0,834	
G-40	0,766	0,739	0,940	1,057	
G-42	0,698	0,766	0,798	0,940	1,254
G-44	0 739	0.847	0974	0934	

**Tabla 5.39:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 8<br/>(30% - 70%) en dirección Y.



Figura 5.52: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 8 (30%-70%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Grupo	5	10	15	20	25
G-2	0,584	0,715	0,808	0,986	1,107
G-6	0,590	0,719	0,842	1,063	
G-7	0,579	0,715	0,884	0,981	
G-8	0,636	0,754	0,881	1,023	
G-9	0,640	0,776	0,908	1,092	
G-12	0,603	0,721	0,866	1,018	
G-15	0,671	0,780	0,918	1,073	
G-16	0,655	0,772	0,840	1,051	1,242
G-19	0,625	0,743	0,866	0,986	
G-21	0,645	0,751	0,751	0,989	
G-23	0,676	0,786	0,936	1,077	1,343
G-24	0,634	0,751	0,883	0,952	
G-26	0,668	0,800	0,935	1,099	1,239
G-33	0,640	0,753	0,844	0,985	
G-35	0,598	0,731	0,861	0,986	
G-36	0,576	0,715	0,837	0,992	1,068
G-37	0,654	0,751	0,871	1,013	
G-40	0,544	0,717	0,869	0,999	
G-42	0,608	0,703	0,813	0,986	1,180
<b>G-44</b>	0,617	0,749	0,951	1,086	

**Tabla 5.40:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 8(30% - 70%) en dirección X.



**Figura 5.53: representación** de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 8 (30%-70%) en dirección X.


**Figura 5.54:** Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo G-19 de la curva granulométrica 8 (30% - 70%), con diferentes grados de compactación.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	0,686	0,786	0,891	0,906	
G-2	0,637	0,733	0,861	0,886	
G-3	0,683	0,761	0,851	0,857	
G-5	0,763	0,805	0,884	0,952	
G-9	0,701	0,789	0,415	1,007	
G-13	0,644	0,818	0,889	1,007	
G-15	0,669	0,762	0,878	0,964	
G-16	0,718	0,805	0,709	0,802	
G-20	0,644	0,665	0,855	1,037	
G-24	0,689	0,813	0,893	0,880	
G-26	0,690	0,760	0,858	0,956	
G-27	0,671	0,756	0,735	0,815	1,231
G-29	0,636	0,771	0,848	1,038	
G-32	0,621	0,693	0,827	1,015	
G-34	0,674	0,807	0,945	1,074	
G-40	0,706	0,696	0,759	0,874	
G42	0,601	0,731	0,759	0,867	
G-45	0,630	0,756	0,839	0,889	0,712
G-49	0,593	0,797	0,822	0,912	1,009
G-50	0,717	0,843	0,805	0,962	

**Tabla 5.41:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 9<br/>(20% - 80%) en dirección Y.



**Figura 5.55:** representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 9 (20%-80%) en dirección Y.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	0,693	0,799	0,920	1,042	
G-2	0,648	0,761	0,905	1,043	
G-3	0,689	0,839	0,976	1,083	
G-5	0,628	0,732	0,879	1,018	
G-9	0,650	0,776	0,803	1,045	
G-13	0,643	0,784	0,899	1,052	
G-15	0,587	0,701	0,827	1,003	
G-16	0,607	0,776	0,928	1,087	
G-20	0,642	0,808	0,939	1,108	
G-24	0,682	0,789	0,916	1,068	
G-26	0,655	0,786	0,937	1,034	
G-27	0,617	0,710	0,853	1,009	1,150
G-29	0,613	0,739	0,886	1,050	
G-32	0,664	0,770	0,894	1,044	
G-34	0,677	0,795	0,927	1,106	
G-40	0,635	0,755	0,894	1,053	
G-42	0,557	0,662	0,785	0,949	
G-45	0,634	0,731	0,868	1,021	1,148
G-49	0,604	0,705	0,843	1,025	1,213
G-50	0 561	0 704	0.857	1 046	

**Tabla 5.42:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 9<br/>(20% - 80%) en dirección X.



 $\label{eq:Figura 5.56:} Figura 5.56: representación de los valores de conductividad térmica ($\lambda_e$) por la curva granulométrica 9 (20\%-80\%) en dirección X.$ 



Figura 5.57: Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo G-15 de la curva granulométrica 9 (20% - 80%), con diferentes grados de compactación.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupos	5	10	15	20	25
G-5	0,704	0,780	0,910	1,046	
G-7	0,683	0,787	0,910	0,924	
G-8	0,674	0,854	0,851	0,940	1,233
G-9	0,688	0,790	0,890	0,857	
G-13	0,742	0,833	0,807	0,945	
G-14	0,692	0,786		0,942	
G-16	0,696	0,785	0,885	0,912	
G-17	0,642	0,799	0,892	0,816	
G-18	0,723	0,780	0,843	0,910	
G-21	0,706	0,862	0,964	0,832	
G-22	0,671	0,730	0,794	0,897	
G-27	0,736	0,820	0,906	0,899	
G-29	0,640	0,721	0,803	1,000	
G-34	0,643	0,826	0,815	0,890	
G-35	0,722	0,806	0,931	0,830	
G-39	0,704	0,774	0,898	0,976	
<b>G-44</b>	0,618	0,795	0,890	0,850	
G-45	0,655	0,779	0,843	0,877	
G-46	0,683	0,752	0,737	0,906	
G-47	0.616	0 756	0.886	0.956	

**Tabla 5.43:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulo(10% - 90%) en dirección Y.



**Figura 5.58:** representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 10 (10%-90%) en dirección Y.

		Compact	ción del m	odelo [%]	
6	_	Compacta			~ -
Grupo	5	10	15	20	25
G-5	0,675	0,794	0,957	1,060	
G-7	0,599	0,698	0,892	1,053	
G-8	0,645	0,770	0,879	1,042	1,161
G-9	0,614	0,789	0,902	1,040	
G-13	0,562	0,655	0,831	0,966	
G-14	0,676	0,819		1,061	
G-16	0,596	0,757	0,924	1,089	
G-17	0,618	0,757	0,887	1,010	
G-18	0,592	0,715	0,844	0,996	
G-21	0,595	0,722	0,845	1,069	
G-22	0,631	0,755	0,873	1,043	
G-27	0,628	0,745	0,866	1,107	
G-29	0,641	0,747	0,888	1,073	
G-34	0,613	0,779	0,915	1,108	
G-35	0,583	0,676	0,845	0,986	
G-39	0,542	0,702	0,875	1,101	
G-44	0,682	0,811	0,935	1,080	
G-45	0,614	0,740	0,870	0,955	
G-46	0,524	0,645	0,824	0,981	
C 47	0 5 5 0	0 (72	0.700	1 000	



 $\label{eq:Figura 5.59:} Figura 5.59: representación de los valores de conductividad térmica ($\lambda_e$) por la curva granulométrica 10 (10\%-90\%) en dirección X.$ 



**Figura 5.60:** Andamiento de la temperatura en las dos direcciones principales en el modelo G-22 de la curva granulométrica 10 (10% - 90%), con diferentes grados de compactación.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	0,789	0,815	0,740		
G-2	0,690	0,813	0,837	0,856	1,081
G-3	0,675	0,863	0,962	0,957	
G-5	0,660	0,774	0,886	1,009	1,058
G-6	0,664	0,805	0,814	0,924	
G-8	0,550	0,701	0,707	0,859	
G-9	0,635	0,791	0,930	0,958	
G-10	0,657	0,817	0,927	0,915	0,900
G-12	0,698	0,807	0,882	0,920	1,074
G-13	0,728	0,818	0,800	0,950	
G-19	0,668	0,789	0,860	0,963	0,936
G-20	0,617	0,803	0,887	1,030	
G-24	0,790	0,868	0,781	0,822	1,036
G-26	0,654	0,737	0,795	0,904	0,921
G-28	0,635	0,786	0,919	0,931	
G-29	0,584	0,757	0,904	0,881	
G-35	0,655	0,784	0,894	0,925	0,982
G-36	0,639	0,765	0,860	0,833	
G-37	0,610	0,743	0,862	1,039	
G-40	0,593	0,767	0,907	0,933	

**Tabla 5.45:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulo(0% - 100%) en dirección Y.



 $\label{eq:Figura 5.61: representación de los valores de conductividad térmica ($\lambda_e$) por la curva granulométrica 11 (0%-100%) en dirección Y.$ 

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	0,738	0,773	0,911		
G-2	0,587	0,724	0,897	1,076	1,274
G-3	0,593	0,745	0,912	1,079	
G-5	0,697	0,836	0,980	1,120	1,290
G-6	0,569	0,728	0,873	1,045	
G-8	0,756	0,875	1,050	1,155	
G-9	0,673	0,817	0,937	1,060	
G-10	0,621	0,769	0,919	1,121	1,231
G-12	0,558	0,713	0,865	1,060	1,130
G-13	0,623	0,736	0,886	1,064	
G-19	0,625	0,787	0,922	1,061	1,225
G-20	0,618	0,747	0,914	1,107	
G-24	0,553	0,708	0,842	0,996	1,234
G-26	0,591	0,710	0,840	1,007	1,169
G-28	0,684	0,796	0,936	1,101	
G-29	0,596	0,745	0,907	1,074	
G-35	0,563	0,676	0,861	1,010	1,193
G-36	0,626	0,752	0,882	1,045	
G-37	0,675	0,815	0,945	1,129	
G-40	0.633	0.726	0.906	1 0 9 4	

**Tabla 5.46:** Conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) expresa en W/mK de la curva granulométrica 11(0% - 100%) en dirección X.



Figura 5.62: representación de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por la curva granulométrica 11 (0%-100%) en dirección X.



### 5.3.5 Difusividad térmica ( $\alpha$ )

La difusividad térmica ( $\alpha$ ) con unidades mm<sup>2</sup>/s, es una propiedad específica de cada material para caracterizar la conducción de calor en condiciones no estacionarias [39]. Éste valor describe lo rápido que un material reacciona a un cambio de temperatura. Se utiliza la difusividad térmica para predecir procesos de enfriamiento y calentamiento o para simular campos de temperatura. Como se presenta en la ecuación 5.12, la difusividad es un requisito para resolver la ecuación diferencial de Fourier para conducción de calor en condiciones no estacionarias. En la tabla 5.47, se presentan algunos valores de difusividad térmica para entender la magnitud de este parámetro [39].

Material	Conductividad térmica [W/mK]	Difusividad térmica [mm²/s]
Aluminio	230	94,530
Acero	58	16,060
Agua	0,580	0,139
Espuma de poliuretano	0,029	0,433
Yeso	0,810	0,538
Madera	0,130	0,112
Mármol	2,090	0,991
Hormigón	1,400	0,761

 Tabla 5.47: Propiedades térmicas de algunos materiales [40].

Por lo tanto la difusividad térmica expresa la rapidez con la que varía la temperatura en el interior del material, ante una variación de temperatura en las caras del material considerado. Utilizando la ecuación 5.13, se han obtenido los valores de difusividad térmica de los modelo a través de la ecuación 5.17.

$$\alpha = \frac{\lambda_e}{\rho * C_{tot}} \qquad [mm^2/s] \qquad (5.17)$$

La difusividad térmica ( $\alpha$ ), dependiendo de la conductividad térmica ( $\lambda_e$ ), es una propiedad del material que varía con la dirección del flujo de calor. Por lo tanto, con el propósito de hacer una descripción más detallada del material, se han calculado los valores de difusividad térmica en las dos direcciones principales X e Y. Posteriormente se presentaran desde la tabla 5.48 a la tabla 5.69 los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) calculados con los valores presentados anteriormente.

Además, con el propósito de mostrar de manera más clara los resultados obtenidos, se muestran también los gráficos de referencia. Estas figuras, de la 5.64 a la 5.85, nos permiten interpretar más sencillamente los datos obtenidos del análisis de los modelos.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	0,428	0,465	0,507	0,581	
G-2	0,466	0,568	0,596	0,598	0,524
G-5	0,520	0,538	0,558	0,505	
G-7	0,392	0,473	0,536	0,522	
G-8	0,458	0,497	0,563		0,576
G-9	0,388	0,521	0,536	0,569	
G-11	0,468	0,515	0,485	0,498	
G-15	0,472	0,524	0,571	0,508	
G-17	0,532	0,557	0,578	0,603	0,573
G-18	0,545	0,546	0,560	0,561	
G-19	0,415	0,491	0,518	0,489	0,529
G-20	0,383	0,476	0,555	0,556	
G-27	0,481	0,517	0,544	0,572	
G-29	0,333	0,474	0,519	0,488	
G-31	0,418	0,509	0,534	0,569	
G-32	0,400	0,552	0,577	0,536	
G-34	0,518	0,490	0,446	0,535	
G-35	0,444	0,483	0,518	0,519	0,630
G-40	0,502	0,514	0,477	0,502	
G-44	0,470	0,431	0,501	0,471	0,559

**Tabla 5.48:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 1 (100% - 0%) en dirección Y.



**Figura 5.64:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 1 (100%-0%) en dirección Y.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G1	0,430	0,474	0,528	0,562	
G2	0,395	0,475	0,536	0,626	0,709
<b>G5</b>	0,421	0,485	0,530	0,630	
<b>G7</b>	0,404	0,526	0,558	0,610	
<b>G8</b>	0,444	0,508	0,542		0,709
<b>G9</b>	0,415	0,507	0,583	0,660	
G11	0,416	0,467	0,566	0,648	
G15	0,425	0,478	0,516	0,600	
G17	0,384	0,544	0,619	0,664	0,702
G18	0,431	0,511	0,612	0,666	
G19	0,337	0,407	0,496	0,559	0,635
G20	0,424	0,528	0,618	0,683	
G27	0,404	0,503	0,567	0,628	
G29	0,401	0,456	0,513	0,620	
G31	0,429	0,518	0,540	0,601	
G32	0,426	0,470	0,541	0,635	
G34	0,443	0,482	0,510	0,601	
G35	0,405	0,478	0,538	0,581	0,657
G40	0,313	0,362	0,445	0,516	
G44	0 4 5 4	0 487	0.547	0.605	0 702

**Tabla 5.49:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 1 (100% - 0%) en dirección X.





		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	0,466	0,504	0,471	0,583	
G-6	0,470	0,487	0,531	0,592	
G-10	0,523	0,555	0,551	0,524	0,473
G-15	0,402	0,444	0,472	0,534	
G-17	0,458	0,483	0,521	0,482	0,534
G-18	0,465	0,515	0,564	0,555	0,613
G-19	0,429	0,467	0,525	0,549	0,634
G-25	0,418	0,458	0,508	0,529	
G-28	0,398	0,480	0,521	0,523	0,564
G-29	0,473	0,537	0,491	0,541	0,593
G-30	0,443	0,503	0,517	0,437	
G-31	0,467	0,516	0,549	0,556	
G-33	0,420	0,477	0,498	0,470	0,534
G-37	0,436	0,515	0,550	0,619	
G-38	0,427	0,465	0,468	0,558	
G-39	0,446	0,493	0,552	0,595	
G-43	0,431	0,475	0,535		0,660
G-47	0,443	0,475	0,506	0,605	0,618
<b>G-48</b>	0,391	0,477	0,467	0,556	0,468
G-49	0,431	0,472	0,459	0,507	

**Tabla 5.50:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 2 (90% - 10%) en dirección Y.



**Figura 5.66:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 2 (90%-10%) en dirección Y.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	0,396	0,424	0,476	0,552	
G-6	0,441	0,482	0,530	0,570	
G-10	0,337	0,387	0,417	0,516	0,699
G-15	0,408	0,467	0,542	0,616	
G-17	0,383	0,447	0,548	0,634	0,726
G-18	0,447	0,498	0,543	0,611	0,704
G-19	0,378	0,439	0,502	0,567	0,635
G-25	0,452	0,515	0,635	0,654	
G-28	0,382	0,437	0,525	0,591	0,633
G-29	0,382	0,419	0,535	0,553	0,646
G-30	0,397	0,468	0,533	0,539	
G-31	0,419	0,440	0,491	0,575	
G-33	0,372	0,418	0,514	0,548	0,628
G-37	0,453	0,504	0,573	0,644	
G-38	0,437	0,482	0,534	0,577	
G-39	0,405	0,439	0,488	0,578	
G-43	0,441	0,485	0,541		0,671
G-47	0,424	0,527	0,576	0,654	0,674
G-48	0,488	0,524	0,577	0,624	0,672
G-49	0,408	0,485	0,514	0,588	

**Tabla 5.51:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 2 (90% - 10%) en dirección X.



**Figura 5.67:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 2 (90%-10%) en dirección X.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G4	0,425	0,465	0,527	0,560	0,565
G6	0,394	0,458	0,514	0,582	
<b>G8</b>	0,446	0,513	0,561	0,621	
G11	0,400	0,493	0,518	0,488	
G16	0,404	0,459	0,534	0,580	
G17	0,416	0,456	0,480	0,479	
G19	0,354	0,457	0,585	0,492	
G20	0,427	0,411	0,451	0,524	0,684
G24	0,424	0,420	0,462	0,503	
G26	0,441	0,495	0,550	0,603	0,640
G31	0,397	0,458	0,510	0,512	
G32	0,413	0,486	0,521	0,565	0,517
G35	0,404	0,497	0,547	0,614	0,558
G36	0,436	0,462	0,428	0,409	0,585
G40	0,409	0,498	0,546	0,630	0,420
G42	0,412	0,476	0,519	0,574	0,675
G43	0,425	0,491	0,513	0,477	
G50	0,433	0,494	0,501	0,440	

**Tabla 5.52:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 3 (80% - 20%) en dirección Y.



**Figura 5.68:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 3 (80%-20%) en dirección Y.

		Commont	a aián dal m	adala [0/]	
		Compact	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
<b>G4</b>	0,456	0,487	0,539	0,559	0,589
G6	0,386	0,436	0,508	0,548	
<b>G8</b>	0,387	0,475	0,515	0,574	
G11	0,415	0,486	0,520	0,549	
G16	0,401	0,478	0,571	0,601	
G17	0,385	0,433	0,494	0,554	
G19	0,414	0,471	0,566	0,588	
G20	0,398	0,428	0,484	0,541	0,626
G24	0,427	0,469	0,525	0,553	
G26	0,422	0,454	0,516	0,567	0,644
G31	0,474	0,571	0,604	0,660	
G32	0,422	0,471	0,514	0,583	0,605
G35	0,425	0,484	0,533	0,601	0,662
G36	0,441	0,506	0,559	0,589	0,653
G40	0,392	0,430	0,540	0,622	0,686
G42	0,393	0,458	0,511	0,600	0,667
G43	0,418	0,467	0,540	0,603	
G50	0,457	0,473	0,534	0,588	

**Tabla 5.53:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 3 (80% - 20%) en dirección X.



**Figura 5.69:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 3 (80%-20%) en dirección X.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	0,466	0,556	0,482	0,569	
G-9	0,499	0,553	0,607	0,493	
G-12	0,463	0,508	0,568	0,508	
G-13	0,487	0,532	0,553		
G-20	0,485	0,516	0,550	0,549	
G-21	0,447	0,518	0,518	0,644	0,560
G-25	0,484	0,457	0,530	0,510	
G-28	0,430	0,499	0,563	0,607	
G-34	0,460	0,492	0,461		
G-35	0,417	0,469	0,544	0,608	
G-39	0,477	0,532	0,530		0,579
G-40	0,423	0,486	0,470	0,479	
G-41	0,453	0,471	0,515		
G-43	0,465	0,509	0,590		
G-45	0,406	0,467	0,511	0,587	
G-46	0,419	0,464	0,486	0,441	
<b>G-48</b>	0,466	0,480	0,498	0,499	
G-49	0,409	0,434	0,460	0,441	0,560
G-50	0.486	0.536	0.530	0.559	

**Tabla 5.54:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 4 (70% - 30%) en dirección Y.



**Figura 5.70:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 4 (70%-30%) en dirección Y.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-1	0,448	0,513	0,561	0,610	
G-9	0,420	0,451	0,518	0,584	
G-12	0,483	0,514	0,566	0,604	
G-13	0,408	0,445	0,472		
G-20	0,384	0,448	0,498	0,564	
G-21	0,398	0,447	0,511	0,569	0,626
G-25	0,450	0,518	0,533	0,636	
G-28	0,474	0,513	0,565	0,610	
G-34	0,445	0,534	0,558		
G-35	0,464	0,472	0,539	0,617	
G-39	0,425	0,442	0,485		0,662
G-40	0,436	0,490	0,557	0,635	
G-41	0,425	0,476	0,546		
G-43	0,435	0,484	0,514		
G-45	0,488	0,523	0,546	0,566	
G-46	0,447	0,456	0,496	0,540	
<b>G-48</b>	0,478	0,528	0,578	0,645	
G-49	0,435	0,468	0,569	0,599	0,666
G-50	0,428	0,489	0,519	0,562	

**Tabla 5.55:** Difusividad térmica (α) expresa en mm²/s de la curva granulométrica 4 (70% - 30%)<br/>en dirección X.



**Figura 5.71:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 4 (70%-30%) en dirección X.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-2	0,495	0,488	0,496	0,482	
G-3	0,467	0,541	0,592	0,371	
G-4	0,492	0,490	0,525	0,546	
G-5	0,438	0,528	0,576	0,542	0,544
G-6	0,456	0,515	0,549	0,641	
G-7	0,460	0,548	0,609	0,505	0,550
G-8	0,464	0,529	0,556	0,578	
G-13	0,466	0,494	0,474	0,597	0,551
G-15	0,477	0,537	0,573	0,594	0,430
G-16	0,470	0,546	0,600	0,551	0,545
G-17	0,446	0,524	0,579	0,550	0,526
G-22	0,436	0,531	0,580	0,622	0,741
G-23	0,427	0,452	0,536	0,600	
G-24	0,456	0,511	0,499	0,527	0,516
G-27	0,459	0,527	0,498	0,588	0,650
G-28	0,417	0,512	0,580		
G-29	0,389	0,444	0,450	0,508	
G-31	0,440	0,467	0,514	0,603	0,561
G-32	0,382	0,432	0,526	0,570	0,683
G-34	0,454	0,483	0,482	0,585	

**Tabla 5.56:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 5 (60% - 40%) en dirección Y.



**Figura 5.72:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 5 (60%-40%) en dirección Y.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-2	0,462	0,512	0,546	0,610	
G-3	0,426	0,458	0,524	0,620	
G-4	0,407	0,465	0,528	0,592	
G-5	0,449	0,489	0,562	0,622	0,708
G-6	0,421	0,479	0,510	0,612	
G-7	0,453	0,496	0,564	0,610	0,686
G-8	0,431	0,486	0,548	0,585	
G-13	0,423	0,506	0,554	0,631	0,722
G-15	0,500	0,552	0,625	0,628	0,714
G-16	0,404	0,469	0,543	0,621	0,681
G-17	0,359	0,438	0,490	0,589	0,666
G-22	0,384	0,442	0,512	0,598	0,747
G-23	0,461	0,470	0,512	0,567	
G-24	0,454	0,490	0,527	0,602	0,684
G-27	0,464	0,513	0,574	0,619	0,682
G-28	0,408	0,467	0,519		
G-29	0,452	0,492	0,548	0,609	
G-31	0,419	0,445	0,501	0,603	0,685
G-32	0,369	0,409	0,477	0,551	0,618
G-34	0 412	0 462	0 542	0 571	

**Tabla 5.57:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 5 (60% - 40%) en dirección X.



**Figura 5.73:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 5 (60%-40%) en dirección X.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-2	0,486	0,562	0,494	0,547	0,574
G-3	0,476	0,507	0,506	0,550	0,602
G-5	0,396	0,480	0,524	0,524	
G-6	0,441	0,524	0,543	0,520	0,576
G-9	0,478	0,581	0,613	0,644	
G-12	0,434	0,525	0,502	0,532	
G-13	0,450	0,508	0,487	0,575	
G-15	0,415	0,472	0,453	0,506	0,443
G-20	0,463	0,533	0,528	0,454	
G-22	0,436	0,524	0,554		
G-23	0,465		0,602	0,630	0,676
G-24	0,468	0,518	0,577	0,651	0,697
G-25	0,443	0,478	0,519	0,533	
G-32	0,456	0,505	0,588	0,525	
G-35	0,484	0,553	0,598	0,633	
G-38	0,362	0,441	0,575	0,557	
G-40	0,420	0,441	0,554		
G-42	0,421	0,435	0,476		
G-49	0,485	0,546	0,552	0,640	
G-50	0,417	0,527	0,599	0,637	

**Tabla 5.58:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 6 (50% - 50%) en dirección Y.



**Figura 5.74:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 6 (50%-50%) en dirección Y.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-2	0,397	0,475	0,554	0,635	0,685
G-3	0,440	0,495	0,535	0,582	0,642
G-5	0,435	0,496	0,542	0,649	
G-6	0,431	0,510	0,550	0,569	0,678
G-9	0,413	0,464	0,538	0,590	
G-12	0,457	0,479	0,512	0,581	
G-13	0,444	0,493	0,535	0,599	
G-15	0,446	0,499	0,538	0,581	0,664
G-20	0,447	0,498	0,568	0,635	
G-22	0,371	0,426	0,497		
G-23	0,406		0,569	0,613	0,667
G-24	0,455	0,523	0,583	0,640	0,693
G-25	0,423	0,495	0,560	0,591	
G-32	0,425	0,462	0,540	0,594	
G-35	0,475	0,514	0,560	0,618	
G-38	0,422	0,472	0,518	0,570	
G-40	0,438	0,478	0,553		
G-42	0,408	0,490	0,585		
G-49	0,434	0,479	0,534	0,626	
G-50	0.437	0.490	0.527	0.612	

**Tabla 5.59:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 6 (50% - 50%) en dirección X.



**Figura 5.75:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 6 (50%-50%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]						
Grupo	5	10	15	20	25		
G-1	0,488	0,570	0,616				
G-3	0,459	0,532	0,561	0,516	0,510		
G-5	0,443	0,532	0,579	0,647	0,614		
G-9	0,483	0,528	0,579	0,650			
G-10	0,465	0,541	0,578	0,523	0,629		
G-11	0,398	0,454	0,523	0,509			
G-12	0,491	0,536	0,566	0,511			
G-13	0,492	0,545	0,510	0,601			
G-17	0,476	0,531	0,479	0,597	0,540		
G-21	0,483	0,526	0,559	0,604	0,684		
G-24	0,507	0,537	0,566	0,603	0,690		
G-25	0,470	0,525	0,552	0,531	0,663		
G-26	0,470	0,511	0,528	0,666			
G-27	0,471	0,508	0,513	0,565	0,498		
G-29	0,513	0,545	0,559	0,595	0,650		
G-31	0,491	0,534	0,494	0,621			
G-35	0,463	0,532	0,589	0,625	0,598		
G-36	0,490	0,469	0,569	0,660			
G-37	0,474	0,524	0,481	0,505			
G-43	0,412	0,451	0,563	0,588	0,593		

**Tabla 5.60:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 7 (40% - 60%) en dirección Y.



**Figura 5.76:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 7 (40%-60%) en dirección Y.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G1	0,468	0,503	0,573		
G3	0,430	0,488	0,572	0,626	0,668
G5	0,431	0,499	0,550	0,624	0,666
<b>G9</b>	0,408	0,448	0,509	0,580	
G10	0,478	0,534	0,581	0,625	0,705
G11	0,444	0,501	0,553	0,618	
G12	0,400	0,485	0,556	0,674	
G13	0,433	0,466	0,508	0,579	
G17	0,443	0,512	0,536	0,588	0,653
G21	0,381	0,465	0,515	0,562	0,603
G24	0,416	0,461	0,521	0,512	0,597
G25	0,427	0,486	0,518	0,606	0,677
G26	0,454	0,514	0,583	0,620	
G27	0,475	0,531	0,555	0,581	0,670
G29	0,497	0,534	0,600	0,654	0,686
G31	0,338	0,401	0,446	0,564	
G35	0,434	0,471	0,553	0,607	0,673
G36	0,471	0,514	0,546	0,605	
G37	0,455	0,505	0,554	0,608	
G43	0 4 9 7	0 507	0 561	0.623	0.695

**Tabla 5.61:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 7 (40% - 60%) en dirección X.



**Figura 5.77:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 7 (40%-60%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]						
Grupo	5	10	15	20	25		
G-2	0,522	0,563	0,571	0,545	0,360		
G-6	0,517	0,510	0,589	0,556			
G-7	0,469	0,526	0,487	0,605			
G-8	0,488	0,533	0,521	0,599			
G-9	0,464	0,509	0,571	0,627			
G-12	0,541	0,574	0,620	0,545			
G-15	0,501	0,543	0,610	0,557			
G-16	0,484	0,513	0,389	0,616	0,562		
G-19	0,517	0,549	0,604	0,679			
G-21	0,460	0,477	0,452	0,502			
G-23	0,506	0,534	0,544	0,452	0,539		
G-24	0,485	0,502	0,541	0,517			
G-26	0,472	0,521	0,523	0,555	0,585		
G-33	0,467	0,496	0,569	0,597			
G-35	0,434	0,481	0,539	0,493			
G-36	0,484	0,513	0,559	0,506	0,525		
G-37	0,464	0,493	0,540	0,509			
G-40	0,554	0,508	0,608	0,644			
G-42	0,505	0,525	0,517	0,574	0,715		
G-44	0,533	0,580	0,629	0.570			

**Tabla 5.62:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 8 (30% - 70%) en dirección Y.



Figura 5.78: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva granulométrica 8 (30%-70%) en dirección Y.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Grupo	5	10	15	20	25
G-2	0,422	0,490	0,523	0,601	0,677
G-6	0,427	0,492	0,545	0,646	
G-7	0,418	0,490	0,572	0,597	
G-8	0,460	0,517	0,574	0,623	
G-9	0,463	0,530	0,587	0,662	
G-12	0,437	0,493	0,560	0,622	
G-15	0,483	0,533	0,593	0,653	
G-16	0,473	0,529	0,546	0,639	0,711
G-19	0,451	0,508	0,560	0,599	
G-21	0,468	0,514	0,488	0,607	
G-23	0,489	0,539	0,605	0,660	0,769
G-24	0,458	0,515	0,571	0,582	
G-26	0,483	0,549	0,605	0,671	0,718
G-33	0,463	0,517	0,547	0,600	
G-35	0,432	0,500	0,555	0,601	
G-36	0,416	0,488	0,540	0,604	0,614
G-37	0,472	0,515	0,562	0,618	
G-40	0,393	0,493	0,562	0,609	
G-42	0,439	0,482	0,527	0,602	0,673
G-44	0 4 4 5	0.513	0.614	0.663	

**Tabla 5.63:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 8 (30% - 70%) en dirección X.



**Figura 5.79:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 8 (30%-70%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]						
Grupo	5	10	15	20	25		
G-1	0,496	0,539	0,576	0,554			
G-2	0,459	0,501	0,556	0,538			
G-3	0,493	0,521	0,550	0,522			
G-5	0,551	0,550	0,571	0,580			
G-9	0,507	0,540	0,290	0,613			
G-13	0,466	0,560	0,575	0,612			
G-15	0,484	0,522	0,568	0,587			
G-16	0,524	0,557	0,464	0,494			
G-20	0,466	0,457	0,554	0,632			
G-24	0,499	0,558	0,579	0,538			
G-26	0,491	0,513	0,547	0,572			
G-27	0,485	0,518	0,476	0,498	0,702		
G-29	0,462	0,530	0,550	0,636			
G-32	0,449	0,474	0,534	0,617			
G-34	0,481	0,543	0,599	0,640			
G-40	0,510	0,477	0,491	0,534			
G-42	0,436	0,502	0,493	0,531			
G-45	0,455	0,517	0,542	0,540	0,418		
G-49	0,430	0,546	0,533	0,557	0,583		
G-50	0,517	0,575	0,520	0,588			

**Tabla 5.64:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 9 (20% - 80%) en dirección Y.



**Figura 5.80:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 9 (20%-80%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]					
Grupo	5	10	15	20	25	
G-1	0,501	0,548	0,595	0,637		
G-2	0,467	0,521	0,584	0,634		
G-3	0,498	0,574	0,630	0,660		
G-5	0,453	0,500	0,568	0,620		
G-9	0,470	0,531	0,560	0,637		
G-13	0,466	0,537	0,581	0,640		
G-15	0,425	0,480	0,535	0,611		
G-16	0,443	0,536	0,608	0,670		
G-20	0,465	0,555	0,608	0,675		
G-24	0,494	0,541	0,593	0,653		
G-26	0,466	0,531	0,597	0,619		
G-27	0,446	0,486	0,553	0,616	0,655	
G-29	0,445	0,508	0,575	0,644		
G-32	0,480	0,527	0,578	0,635		
G-34	0,483	0,535	0,588	0,659		
G-40	0,459	0,518	0,579	0,644		
G-42	0,404	0,455	0,510	0,581		
G-45	0,458	0,500	0,560	0,621	0,674	
G-49	0,438	0,483	0,547	0,626	0,701	
G-50	0 4 0 4	0 480	0.554	0.640		

**Tabla 5.65:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 9 (20% - 80%) en dirección X.



**Figura 5.81:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 9 (20%-80%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]					
Grupo	5	10	15	20	25	
G-5	0,507	0,532	0,588	0,637		
G-7	0,492	0,538	0,589	0,562		
G-8	0,487	0,585	0,550	0,573	0,705	
G-9	0,497	0,539	0,575	0,522		
G-13	0,535	0,569	0,521	0,575		
G-14	0,500	0,537		0,573		
G-16	0,504	0,538	0,573	0,557		
G-17	0,466	0,548	0,578	0,500		
G-18	0,522	0,532	0,544	0,554		
G-21	0,509	0,588	0,622	0,507		
G-22	0,485	0,500	0,513	0,547		
G-27	0,531	0,561	0,586	0,546		
G-29	0,462	0,495	0,520	0,609		
G-34	0,464	0,564	0,527	0,542		
G-35	0,524	0,553	0,604	0,508		
G-39	0,507	0,529	0,580	0,593		
<b>G-44</b>	0,448	0,544	0,576	0,520		
G-45	0,475	0,534	0,547	0,539		
<b>G-46</b>	0,495	0,516	0,479	0,553		
G-47	0,447	0,520	0,578	0,583		

**Tabla 5.66:** Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm²/s de la curva granulométrica 10 (10% - 90%)<br/>en dirección Y.



**Figura 5.82:** representación de los valores de difusividad térmica (α) por la curva granulométrica 10 (10%-90%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]					
Grupo	5	10	15	20	25	
G-5	0,486	0,542	0,618	0,645		
G-7	0,432	0,477	0,577	0,641		
G-8	0,466	0,527	0,568	0,635	0,664	
G-9	0,444	0,539	0,582	0,633		
G-13	0,405	0,448	0,537	0,587		
G-14	0,489	0,560		0,646		
G-16	0,432	0,518	0,598	0,665		
G-17	0,448	0,519	0,575	0,619		
G-18	0,427	0,488	0,544	0,606		
G-21	0,429	0,493	0,545	0,652		
G-22	0,456	0,518	0,564	0,636		
G-27	0,453	0,510	0,560	0,673		
G-29	0,463	0,513	0,575	0,654		
G-34	0,442	0,532	0,592	0,674		
G-35	0,423	0,464	0,548	0,604		
G-39	0,390	0,479	0,565	0,669		
G-44	0,494	0,555	0,605	0,661		
G-45	0,446	0,508	0,564	0,587		
G-46	0,380	0,442	0,535	0,598		
G-47	0 399	0 462	0 521	0.611		

**Tabla 5.67:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 10 (10% - 90%) en dirección X.





Marco Binfarè

	Compactación del modelo [%]					
Grupo	5	10	15	20	25	
G-1	0,572	0,561	0,482			
G-2	0,500	0,558	0,543	0,525	0,621	
G-3	0,489	0,591	0,624	0,585		
G-5	0,478	0,530	0,573	0,616	0,606	
G-6	0,481	0,553	0,529	0,565		
G-8	0,397	0,479	0,457	0,522		
G-9	0,458	0,541	0,600	0,583		
G-10	0,475	0,560	0,599	0,558	0,519	
G-12	0,506	0,556	0,573	0,563	0,622	
G-13	0,526	0,560	0,518	0,580		
G-19	0,484	0,543	0,558	0,591	0,540	
G-20	0,446	0,549	0,572	0,625		
G-24	0,573	0,596	0,508	0,503	0,593	
G-26	0,474	0,506	0,517	0,553	0,530	
G-28	0,459	0,538	0,594	0,570		
G-29	0,421	0,517	0,583	0,536		
G-35	0,474	0,537	0,579	0,564	0,569	
G-36	0,463	0,525	0,557	0,511		
G-37	0,442	0,510	0,558	0,633		
G-40	0,429	0,526	0,587	0,569		

**Tabla 5.68:** Difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa en mm²/s de la curva granulométrica 11 (0% - 100%)<br/>en dirección Y.



Figura 5.84: representación de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) por la curva granulométrica 11 (0%-100%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]					
Grupo	5	10	15	20	25	
G-1	0,535	0,532	0,594			
G-2	0,425	0,497	0,582	0,660	0,732	
G-3	0,429	0,510	0,592	0,659		
G-5	0,504	0,573	0,634	0,684	0,739	
G-6	0,413	0,500	0,567	0,639		
G-8	0,546	0,598	0,679	0,702		
G-9	0,486	0,558	0,605	0,645		
G-10	0,449	0,527	0,594	0,684	0,710	
G-12	0,405	0,491	0,562	0,649	0,654	
G-13	0,450	0,504	0,574	0,649		
G-19	0,453	0,542	0,599	0,651	0,707	
G-20	0,446	0,511	0,590	0,672		
G-24	0,401	0,486	0,548	0,609	0,706	
G-26	0,429	0,488	0,546	0,616	0,672	
G-28	0,495	0,545	0,605	0,674		
G-29	0,429	0,508	0,584	0,653		
G-35	0,408	0,463	0,557	0,616	0,691	
G-36	0,454	0,516	0,572	0,641		
G-37	0,489	0,559	0,612	0,688		
G-40	0 458	0 4 9 8	0.586	0.667		

**Tabla 5.69:** Difusividad térmica (α) expresa en mm<sup>2</sup>/s de la curva granulométrica 11 (0% - 100%) en dirección X.





## CAPÍTULO 6

# **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

### 6.1 Introducción

En el capítulo sexto se afrontará el análisis de los resultados presentados en el capítulo anterior. En una primera parte, se analizaran los resultados simulados con el fin de obtener resultados que no estén afectados por errores del modelo o aleatorios. Se presentará el método utilizado para eliminar los resultados que no están en un intervalo razonable, determinado a través de un análisis estadístico de los valores.

Terminado este apartado, se presentarán a través de una serie de figuras los principales datos estadísticos con el fin de destacar de manera más sencilla los valores diferentes que se han obtenido en las diferentes curvas. Terminada la parte de descripción general, se pasará al tratamiento de todas las propiedades que se han presentado en el capítulo 5. Se calculará la recta tendencia para cada curva granulométrica y en las dos direcciones principales. La recta tendencia es la recta que expresa el andamiento de la entera curva granulométrica, para determinar si este parámetro es fiable, se calculará también la desviación estándar de la recta.

En la parte principal de este capítulo, se mostrara, las figuras de las diferentes propiedades térmicas del HoPo, es decir densidad ( $\rho$ ), calor especifico ( $C_{tot}$ ), conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) y difusividad térmica ( $\alpha$ ). Como resumen de los resultados obtenidos y para dejar más claros los análisis que se han hecho, en la parte final, se presentarán algunas figuras que permitirán leer de manera más directa el comportamiento del HoPo en cada propiedad presentada anteriormente.

#### 6.2 Depuración de los resultados experimentales

Al trabajar con datos obtenidos a través de un proceso de predicción es decir a través del modelo descripto en este trabajo de tesis, generalmente se producen datos "extraños" que pueden ser resultado de errores en el modelo, o de las operaciones aritméticas de quienes operan con ellos. Se necesita entonces de individualizar y eliminar los errores que se han hecho para obtener un análisis final más correcto.

En estadística a estos valores se les llama "outliers", los cuales son sospechosos de no pertenecer al conjunto de datos de donde proceden, o ser producto de algún suceso sumamente extraño [41]. Podemos tener valores outliers moderados y extremos que se desvían de la tendencia de los otros datos. La estadística ofrece criterios para detectar estos valores outliers.

Existen diversos criterios para detectar valores outliers en un conjunto determinado de datos. En este trabajo de tesis se ha decidido identificar los outliers a través el estudio de la desviación estándar de los datos. El primer paso para una análisis estadístico es determinar todos los parámetros estadísticos, como el valor mínimo, máximo, desviación estándar de todas las curvas granulométricas y para cada dirección principal (X i Y).

La primera etapa consiste en determinar los valores que no se pueden aceptar en el estudio, calcular los principales valores estadísticos de cada curva y en cada dirección principal. Para este estudio se ha decidido calcular el valor mínimo y máximo, el promedio y el promedio geométrico, la variación, la desviación estándar y como último la mediana de los valores de cada curva. Una vez determinados todos estos valores es posible determinar el valor mínimo y máximo aceptable para cada curva y para cada grado de compactación.

Se determina por lo tanto el valor mínimo y máximo de cada curva granulométrica y de cada grado de compactación simplemente mirando los valores obtenidos y destacando el máximo y el mínimo. Luego se pasa a calcular la media, la media geométrica y la mediana, la cual representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados, de cada curva granulométrica según las ecuaciones 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 respectivamente.

$$\bar{M} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n} x_i$$
(6.1)

$$\overline{M}_{geometrica} = \sqrt[n]{x_1 * x_2 * x_3 * \dots * x_n}$$
(6.2)

$$Me = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{2} Si \ la \ suma \ de \ las \ frecuencias \ es \ igual$$
(6.3)

$$Me = \frac{1 + \sum_{i=1}^{n} X_i}{2} \text{ Si la suma de las frecuencias es impar}$$
(6.4)
Una vez determinados los valores medios de cada curva, se pasa a calcular la dispersión de los datos obtenidos. Las medidas de dispersión nos permiten reconocer cuanto se dispersan los datos los puntos centrales, de hecho indican cuanto se desvían las observaciones de su promedio aritmético (Media). Este tipo de medidas son parámetros informativos que nos permiten conocer como los valores de los datos pueden variar, mediante un valor numérico que representa el promedio de dispersión de los datos [42]. Las medidas de dispersión más importantes y las más utilizadas son la Varianza y la Desviación estándar. Por lo tanto se han calculado estos dos parámetros con el propósito de entender como los valores medidos se alejan del valor medio.

La varianza permite identificar la diferencia promedio que hay entre cada uno de los valores respecto a su punto central (Media  $\overline{M}$ ). Este valor es calculado, elevando cada una de las diferencias al cuadrado (esta operación se hace con fin de eliminar los signos negativos), y calculando su media. Por lo tanto, como se muestra en la ecuación 6.5, se suman todos los cuadrados de las diferencias de cada valor respecto a la media y se divide este resultado por el número de observaciones que se tengan.

$$S^{2} = \frac{(X_{1} - \bar{X})^{2} + (X_{2} - \bar{X})^{2} + (X_{3} - \bar{X})^{2} + \dots + (X_{n} - \bar{X})^{2}}{(n-1)} = \frac{\sum (X_{i} - \bar{X})^{2}}{(n-1)}$$
(6.5)

Donde (S<sup>2</sup>) representa la varianza, (X<sub>i</sub>) representa cada uno de los valores medidos,  $(\bar{X})$  representa la media calculada por la ecuación 6.1, y (n) es el número de observaciones. Es necesario resaltar que la varianza nos da como resultado el promedio de la desviación, pero este valor se encuentra elevado al cuadrado. Por lo tanto, se ha procedido a calcular la desviación estándar.

La desviación estándar, permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a su punto central. La desviación estándar permite calcular un valor numérico que representa el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media. Para calcular la desviación estándar se hace la raíz cuadrada de la varianza, como se muestra en la ecuación 6.6.

$$S = \sqrt[2]{S^2} \tag{6.6}$$

Una vez determinados todos los parámetros estadísticos necesarios, se han calculado los valores máximos y mínimos aceptables para cada curva granulométrica, para cada grupo, nivel de compactación y para cada dirección principal. El cálculo de los valores se hace a través de la ecuación 6.7 para el valor mínimo aceptable y a través de la ecuación 6.8 para el valor máximo aceptable.

$$Val. minimo \ aceptable = \overline{M}_i - S_i \tag{6.7}$$

$$Val. máximo \ aceptable = \overline{M}_i + S_i \tag{6.8}$$

Posteriormente se presentaran los resultados obtenidos a través del análisis estadístico por cada propiedad calculada por el capítulo cinco, es decir, densidad, calor especifico, conductividad térmica y como ultima la difusividad térmica.

### 6.2.1 Análisis estadístico de la densidad ( $\rho$ )

Posteriormente, en las tablas de la 6.1 a la 6.11, se presentan los resultados del análisis estadístico para los resultados de los valores de densidad ( $\rho$ ) obtenidos en el capítulo cinco. Se destacan también los valores mínimos y máximos que pueden ser aceptados. Los valores están calculados con las ecuaciones presentadas anteriormente para cada curva granulométrica. En el caso de la densidad no se consideran las dos direcciones principales X e Y porque esta propiedad no se ve afectada por la dirección del flujo de calor.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	1557,80	1650,61	1653,45	1852,01	1964,32
Máximo	1613,78	1698,94	1800,90	1913,05	2011,17
Media ( $\overline{M}$ )	1574,08	1663,18	1756,62	1868,36	1987,94
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	1574,03	1663,14	1756,41	1868,30	1987,88
Varianza (S <sup>2</sup> )	163,62	140,28	761,94	221,32	273,46
Desviación estándar (S)	12,79	11,84	27,60	14,88	16,54
Mediana $(M_e)$	1571,28	1661,17	1757,28	1865,85	1986,20
Val. min. aceptable	1561,29	1651,34	1729,01	1853,48	1971,40
Val. máx. aceptable	1586,87	1675,03	1784,22	1883,24	2004,47

Tabla 6.1: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 1 (100% - 0%).

	Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	1535,25	1650,75	1750,20	1853,28	1959,22	
Máximo	1591,37	1679,43	1780,10	1886,08	2016,32	
Media ( $\overline{M}$ )	1574,05	1663,00	1761,09	1868,28	1988,68	
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	1574,00	1662,97	1761,06	1868,24	1988,60	
Varianza (S <sup>2</sup> )	175,52	110,08	102,96	126,55	332,37	
Desviación estándar (S)	13,25	10,49	10,15	11,25	18,23	
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	1572,56	1661,39	1756,72	1869,43	1986,40	
Val. min. aceptable	1560,80	1652,51	1750,94	1857,03	1970,45	
Val. máx. aceptable	1587,30	1673,49	1771,24	1879,53	2006,91	

Tabla 6.2: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 2 (90% - 10%).

	Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	1546,28	1632,44	1674,63	1815,93	1968,42	
Máximo	1624,94	1713,83	1817,76	1925,04	2041,68	
Media $(\overline{M})$	1583,64	1672,03	1763,31	1876,13	2008,03	
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	1583,52	1671,90	1763,01	1875,95	2007,89	
Varianza (S <sup>2</sup> )	402,34	459,63	1091,43	727,21	610,99	
Desviación estándar (S)	20,06	21,44	33,04	26,97	24,72	
Mediana $(M_e)$	1585,52	1674,06	1771,12	1882,34	2013,65	
Val. min. aceptable	1563,58	1650,59	1730,27	1849,16	1983,31	
Val. máx. aceptable	1603,70	1693,47	1796,34	1903,10	2032,74	

 Tabla 6.3: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 3 (80% - 20%).

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	1557,71	1648,59	1745,03	1848,38	1963,44
Máximo	1598,70	1686,47	1784,44	1894,51	1995,88
Media ( $\overline{M}$ )	1585,76	1672,51	1769,73	1876,83	1980,04
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	1585,75	1672,50	1769,72	1876,80	1979,99
Varianza (S <sup>2</sup> )	65,54	61,29	70,67	125,42	263,48
Desviación estándar (S)	8,10	7,83	8,41	11,20	16,23
Mediana $(M_e)$	1586,81	1673,35	1771,30	1878,93	1980,79
Val. min. aceptable	1577,67	1664,68	1761,33	1865,63	1963,80
Val. máx. aceptable	1593,86	1680,34	1778,14	1888,03	1996,27

Tabla 6.4: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 4 (70% - 30%).

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	1527,51	1612,63	1707,80	1797,10	1899,62
Máximo	1590,43	1677,41	1773,47	1885,94	2006,35
Media $(\overline{M})$	1557,46	1646,38	1742,97	1846,70	1951,25
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	1557,31	1646,21	1742,80	1846,47	1950,89
Varianza (S <sup>2</sup> )	504,63	583,62	609,31	903,52	1579,49
Desviación estándar (S)	22,46	24,16	24,68	30,06	39,74
Mediana $(M_e)$	1554,97	1654,46	1753,56	1834,48	1948,85
Val. min. aceptable	1535,00	1622,22	1718,29	1816,64	1911,51
Val. máx. aceptable	1579,92	1670,53	1767,65	1876,76	1991,00

Tabla 6.5: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 5 (60% - 40%).

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	1580,03	1665,67	1765,96	1728,17	1977,93
Máximo	1590,97	1679,60	1779,65	1889,16	2013,08
Media $(\overline{M})$	1587,32	1673,91	1772,91	1871,57	2002,90
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	1587,31	1673,91	1772,91	1871,23	2002,86
Varianza (S <sup>2</sup> )	8,49	10,87	20,84	1315,85	168,62
Desviación estándar (S)	2,91	3,30	4,57	36,27	12,99
Mediana $(M_e)$	1587,70	1673,65	1773,31	1880,42	2005,34
Val. min. aceptable	1584,40	1670,62	1768,35	1835,30	1989,91
Val. máx. aceptable	1590,23	1677,21	1777,48	1907,85	2015,88

Tabla 6.6: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 6 (50% - 50%).

	Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	1562,15	1649,24	1743,04	1772,52	1956,86	
Máximo	1606,84	1698,02	1789,86	1908,25	2011,75	
Media $(\overline{M})$	1585,63	1674,17	1772,05	1876,06	1997,08	
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	1585,61	1674,15	1772,03	1875,87	1997,03	
Varianza (S <sup>2</sup> )	59,74	73,42	72,51	729,93	212,50	
Desviación estándar (S)	7,73	8,57	8,52	27,02	14,58	
Mediana $(M_e)$	1585,95	1674,63	1773,50	1881,70	1998,74	
Val. min. aceptable	1577,90	1665,61	1763,53	1849,04	1982,50	
Val. máx. aceptable	1593,35	1682,74	1780,56	1903,08	2011,66	

Tabla 6.7: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 7 (40% - 60%).

	Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	1580,09	1666,85	1757,87	1865,89	1873,82	
Máximo	1590,41	1678,59	1776,32	1888,59	2008,22	
Media $(\overline{M})$	1585,38	1672,50	1770,39	1879,03	1975,49	
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	1585,38	1672,50	1770,38	1879,02	1974,92	
Varianza (S <sup>2</sup> )	5,66	7,53	21,74	28,19	2605,24	
Desviación estándar (S)	2,38	2,74	4,66	5,31	51,04	
Mediana $(M_e)$	1585,28	1672,61	1771,04	1878,78	1996,73	
Val. min. aceptable	1583,01	1669,76	1765,72	1873,72	1924,45	
Val. máx. aceptable	1587,76	1675,24	1775,05	1884,34	2026,53	

Tabla 6.8: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 8 (30% - 70%).

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	1569,71	1657,21	1641,37	1859,28	1950,58
Máximo	1610,72	1704,00	1806,92	1923,07	2010,48
Media ( $\overline{M}$ )	1585,72	1674,38	1766,20	1881,31	1981,43
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	1585,70	1674,35	1765,92	1881,26	1981,28
Varianza (S <sup>2</sup> )	84,19	100,74	1003,91	199,97	899,31
Desviación estándar (S)	9,18	10,04	31,68	14,14	29,99
Mediana $(M_e)$	1584,81	1673,39	1771,81	1879,80	1983,23
Val. min. aceptable	1576,54	1664,35	1734,52	1867,17	1951,44
Val. máx. aceptable	1594,90	1684,42	1797,89	1895,45	2011,42

Tabla 6.9: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 9 (20% - 80%).

	Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	1577,43	1666,27	1692,71	1862,84	2004,71	
Máximo	1592,15	1679,61	1776,43	1884,95	2004,71	
Media $(\overline{M})$	1584,76	1674,18	1766,55	1878,59	2004,71	
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	1584,75	1674,18	1766,46	1878,58	2004,71	
Varianza (S <sup>2</sup> )	21,40	13,96	324,45	32,46		
Desviación estándar (S)	4,63	3,74	18,01	5,70		
Mediana $(M_e)$	1585,43	1674,47	1771,49	1879,71	2004,71	
Val. min. aceptable	1580,13	1670,44	1748,54	1872,89		
Val. máx. aceptable	1589,38	1677,92	1784,56	1884,28		

**Tabla 6.10:** Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 10 (10% - 90%).

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	1578,40	1663,71	1757,15	1867,63	1978,19
Máximo	1590,01	1678,72	1777,92	1887,34	2001,54
Media $(\overline{M})$	1583,08	1671,07	1768,56	1876,48	1989,80
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	1583,08	1671,07	1768,55	1876,47	1989,78
Varianza (S <sup>2</sup> )	9,69	17,59	28,90	35,17	75,03
Desviación estándar (S)	3,11	4,19	5,38	5,93	8,66
Mediana $(M_e)$	1582,74	1671,54	1769,65	1876,87	1989,92
Val. min. aceptable	1579,97	1666,88	1763,19	1870,55	1981,14
Val. máx. aceptable	1586,19	1675,27	1773,94	1882,41	1998,46

Tabla 6.11: Valores estadísticos de la densidad por la curva granulométrica 11 (0% - 100%).

## 6.2.2 Análisis estadístico para el calor específico (C<sub>t</sub>)

Posteriormente, en las tablas de 6.12 a 6.22, se presentan los resultados del análisis estadístico para los resultados de los valores de calor específico ( $C_t$ ) obtenidos en el capítulo cinco. Se destacan también los valores mínimos y máximos que pueden ser aceptados. Los valores están calculados con las ecuaciones presentadas anteriormente para cada curva granulométrica. En el caso del calor específico no se consideran las dos direcciones principales X e Y porque esta propiedad no se ve afectada por la dirección del flujo de calor.

		Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25		
Mínimo	872,842	872,837	872,832	872,827	872,822		
Máximo	872,846	872,840	872,840	872,834	872,824		
Media $(\overline{M})$	872,845	872,839	872,834	872,829	872,823		
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	872,845	872,839	872,834	872,829	872,823		
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,0000006	0,0000005	0,0000023	0,0000019	0,0000005		
Desviación estándar (S)	0,0007949	0,0006921	0,0015218	0,0013605	0,0006829		
Mediana $(M_e)$	872,845	872,840	872,834	872,829	872,823		
Val. min. aceptable	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823		
Val. máx. aceptable	872,846	872,840	872,836	872,830	872,824		

Tabla 6.12: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 1 (100% - 0%).

		Compact	tación del mo	delo [%]	
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	872,844	872,838	872,833	872,828	872,822
Máximo	872,848	872,840	872,835	872,834	872,825
Media ( $\overline{M}$ )	872,845	872,839	872,834	872,829	872,823
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo})$	872,845	872,839	872,834	872,829	872,823
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,000008	0,0000004	0,0000003	0,0000017	0,0000006
Desviación estándar (S)	0,0008795	0,0006177	0,0005314	0,0013145	0,0007518
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	872,845	872,840	872,834	872,829	872,823
Val. min. aceptable	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
Val. máx. aceptable	872,846	872,840	872,834	872,830	872,824

 Tabla 6.13: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 2 (90% - 10%).

		Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	872,842	872,837	872,831	872,826	872,821	
Máximo	872,847	872,841	872,839	872,831	872,824	
Media $(\overline{M})$	872,844	872,839	872,834	872,828	872,823	
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	872,844	872,839	872,834	872,828	872,823	
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,0000017	0,0000016	0,0000031	0,0000016	0,0000010	
Desviación estándar (S)	0,0013044	0,0012516	0,0017676	0,0012570	0,0010048	
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	872,844	872,839	872,833	872,828	872,822	
Val. min. aceptable	872,843	872,838	872,832	872,827	872,822	
Val. máx. aceptable	872,846	872,840	872,836	872,830	872,824	

 Tabla 6.14: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 3 (80% - 20%).

		Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25		
Mínimo	872,843	872,838	872,833	872,827	872,823		
Máximo	872,846	872,840	872,835	872,830	872,824		
Media $(\overline{M})$	872,844	872,839	872,833	872,828	872,824		
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo})$	872,844	872,839	872,833	872,828	872,824		
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,0000003	0,0000002	0,0000002	0,0000003	0,0000005		
Desviación estándar (S)	0,0005318	0,0004601	0,0004416	0,0005228	0,0006796		
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	872,844	872,839	872,833	872,828	872,824		
Val. min. aceptable	872,844	872,838	872,833	872,828	872,823		
Val. máx. aceptable	872,845	872,839	872,834	872,829	872,824		

 Tabla 6.15: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 4 (70% - 30%).

		Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823	
Máximo	872,848	872,842	872,837	872,832	872,827	
Media $(\overline{M})$	872,846	872,840	872,835	872,830	872,825	
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo})$	872,846	872,840	872,835	872,830	872,825	
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,0000023	0,0000021	0,0000018	0,0000021	0,0000029	
Desviación estándar (S)	0,0015103	0,0014573	0,0013292	0,0014391	0,0016980	
Mediana $(M_e)$	872,846	872,840	872,834	872,830	872,825	
Val. min. aceptable	872,845	872,839	872,834	872,828	872,823	
Val. máx. aceptable	872,848	872,842	872,836	872,831	872,827	

**Tabla 6.16:** Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 5 (60% - 40%).

		Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	872,844	872,838	872,833	872,828	872,822	
Máximo	872,845	872,839	872,834	872,836	872,824	
Media $(\overline{M})$	872,844	872,839	872,833	872,829	872,823	
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	872,844	872,839	872,833	872,829	872,823	
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,0000000	0,0000000	0,0000001	0,0000033	0,0000003	
Desviación estándar (S)	0,0001894	0,0001919	0,0002359	0,0018193	0,0005375	
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823	
Val. min. aceptable	872,844	872,839	872,833	872,827	872,822	
Val. máx. aceptable	872,844	872,839	872,834	872,830	872,823	

Tabla 6.17: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 6 (50% - 50%).

		Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25		
Mínimo	872,843	872,837	872,832	872,827	872,822		
Máximo	872,846	872,840	872,835	872,833	872,825		
Media $(\overline{M})$	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823		
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823		
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,000003	0,0000002	0,0000002	0,0000017	0,0000004		
Desviación estándar (S)	0,0005029	0,0004995	0,0004459	0,0013113	0,0006048		
Mediana $(M_e)$	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823		
Val. min. aceptable	872,844	872,838	872,833	872,827	872,822		
Val. máx. aceptable	872,845	872,839	872,834	872,830	872,824		

**Tabla 6.18:** Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 7 (40% - 60%).

		Compact	tación del mo	delo [%]	
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
Máximo	872,845	872,839	872,834	872,829	872,828
Media ( $\overline{M}$ )	872,844	872,839	872,833	872,828	872,824
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo})$	872,844	872,839	872,833	872,828	872,824
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,0000000	0,0000000	0,0000001	0,0000001	0,0000049
Desviación estándar (S)	0,0001533	0,0001606	0,0002436	0,0002471	0,0022177
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
Val. min. aceptable	872,844	872,839	872,833	872,828	872,822
Val. máx. aceptable	872,844	872,839	872,834	872,828	872,826

Tabla 6.19: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 8 (30% - 70%).

		Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25		
Mínimo	872,843	872,837	872,832	872,826	872,822		
Máximo	872,845	872,840	872,841	872,829	872,825		
Media $(\overline{M})$	872,844	872,839	872,834	872,828	872,824		
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	872,844	872,839	872,834	872,828	872,824		
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,0000004	0,0000003	0,0000031	0,0000004	0,0000016		
Desviación estándar (S)	0,0005920	0,0005796	0,0017567	0,0006447	0,0012489		
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	872,844	872,839	872,833	872,828	872,824		
Val. min. aceptable	872,844	872,838	872,832	872,827	872,822		
Val. máx. aceptable	872,845	872,839	872,835	872,829	872,825		

Tabla 6.20: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 9 (20% - 80%).

		Compact	tación del mo	delo [%]	
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	872,844	872,838	872,833	872,828	872,823
Máximo	872,845	872,839	872,838	872,829	872,823
Media $(\overline{M})$	872,844	872,839	872,834	872,828	872,823
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	872,844	872,839	872,834	872,828	872,823
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,0000001	0,0000000	0,0000010	0,0000001	
Desviación estándar (S)	0,0003019	0,0002182	0,0009797	0,0002642	
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	872,844	872,839	872,833	872,828	872,823
Val. min. aceptable	872,844	872,839	872,833	872,828	
Val. máx. aceptable	872,845	872,839	872,835	872,828	

**Tabla 6.21:** Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 10 (10% - 90%).

		Compactación del modelo [%]					
Dato	5 10 15 20 2						
Mínimo	872,637	872,632	872,626	872,621	872,823		
Máximo	872,845	872,839	872,834	872,829	872,824		
Media $(\overline{M})$	872,834	872,829	872,823	872,817	872,823		
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo})$	872,834	872,829	872,823	872,817	872,823		
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,0021441	0,0021457	0,0021483	0,0022520	0,0000001		
Desviación estándar (S)	0,0463047	0,0463214	0,0463496	0,0474556	0,0003622		
Mediana $(M_e)$	872,844	872,839	872,834	872,828	872,823		
Val. min. aceptable	872,788	872,782	872,777	872,770	872,823		
Val. máx. aceptable	872,880	872,875	872,870	872,865	872,824		

Tabla 6.22: Valores estadísticos de Calor especifico por la curva granulométrica 11 (0% - 100%).

# 6.2.3 Análisis estadístico para la conductividad térmica (λe)

En las tablas de la 6.23 a la 6.44, se presentan los resultados del análisis estadístico para los resultados de los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) obtenidos en el capítulo cinco. Se destacan también los valores mínimos y máximos que pueden ser aceptados. Los valores están calculados con las ecuaciones presentadas anteriormente para cada curva granulométrica. En el caso de la conductividad térmica, se presentan también los resultados en las dos direcciones principales X e ya que esta propiedad se ve influenciada por la dirección del flujo de calor.

	Compactación del modelo [%]						
Dato	5	10	15	20	25		
Mínimo	0,456	0,630	0,701	0,771	0,899		
Máximo	0,753	0,821	0,912	0,986	1,101		
Media $(\overline{M})$	0,621	0,736	0,819	0,877	0,981		
Media Geométrica ( $ar{M}_{geo})$	0,616	0,734	0,817	0,875	0,979		
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,006	0,003	0,003	0,004	0,005		
Desviación estándar (S)	0,080	0,051	0,056	0,066	0,072		
Mediana $(M_e)$	0,634	0,743	0,819	0,885	0,988		
Val. min. aceptable	0,541	0,685	0,763	0,811	0,909		
Val. máx. aceptable	0,701	0,787	0,875	0,944	1,053		

Tabla 6.23: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 1(100% - 0%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]						
Dato	5	10	15	20	25		
Mínimo	0,433	0,530	0,688	0,846	1,097		
Máximo	0,629	0,790	0,954	1,109	1,232		
Media $(\overline{M})$	0,563	0,702	0,835	1,004	1,190		
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	0,561	0,699	0,833	1,002	1,189		
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,004	0,004	0,005	0,003		
Desviación estándar (S)	0,048	0,060	0,062	0,068	0,055		
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	0,576	0,707	0,831	1,008	1,216		
Val. min. aceptable	0,515	0,641	0,774	0,936	1,135		
Val. máx. aceptable	0,612	0,762	0,897	1,072	1,245		

**Tabla 6.24:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 1<br/>(100% - 0%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	0,534	0,642	0,707	0,707	0,801	
Máximo	0,722	0,808	0,877	1,012	1,152	
Media $(\overline{M})$	0,607	0,711	0,788	0,885	0,988	
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	0,606	0,710	0,787	0,882	0,981	
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,002	0,003	0,006	0,014	
Desviación estándar (S)	0,043	0,041	0,052	0,079	0,120	
Mediana $(M_e)$	0,603	0,699	0,794	0,892	1,011	
Val. min. aceptable	0,564	0,671	0,736	0,806	0,869	
Val. máx. aceptable	0,650	0,752	0,841	0,965	1,108	

**Tabla 6.25:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 2(90% - 10%) en dirección Y.

		Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25		
Mínimo	0,465	0,563	0,642	0,844	1,083		
Máximo	0,666	0,77	0,986	1,074	1,252		
Media $(\overline{M})$	0,56675	0,674	0,81435	0,960684	1,161		
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	0,564656	0,671644	0,811439	0,958447	1,159655		
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002484	0,003323	0,004916	0,004558	0,003489		
Desviación estándar (S)	0,049841	0,057649	0,070117	0,067513	0,059071		
Mediana (M <sub>e</sub> )	0,563	0,675	0,8165	0,952	1,1605		
Val. min. aceptable	0,516909	0,616351	0,744233	0,893171	1,101929		
Val. máx. aceptable	0,617	0,732	0,884	1,028	1,220		

**Tabla 6.26:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 2(90% - 10%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,483	0,603	0,672	0,680	0,722
Máximo	0,620	0,754	0,892	1,040	1,208
Media $(\overline{M})$	0,573	0,688	0,792	0,879	1,019
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	0,572	0,687	0,790	0,872	1,007
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,002	0,004	0,012	0,025
Desviación estándar (S)	0,033	0,040	0,059	0,110	0,160
Mediana $(M_e)$	0,578	0,691	0,790	0,886	1,010
Val. min. aceptable	0,540	0,649	0,733	0,768	0,859
Val. máx. aceptable	0,606	0,728	0,852	0,989	1,178

**Tabla 6.27:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 3(80% - 20%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,535	0,628	0,742	0,870	1,016
Máximo	0,643	0,818	0,917	1,062	1,178
Media $(\overline{M})$	0,577	0,687	0,818	0,953	1,124
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	0,576	0,686	0,817	0,952	1,123
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,002	0,002	0,002	0,003
Desviación estándar (S)	0,034	0,045	0,045	0,049	0,057
Mediana $(M_e)$	0,567	0,690	0,816	0,951	1,148
Val. min. aceptable	0,542	0,642	0,773	0,905	1,067
Val. máx. aceptable	0,611	0,732	0,863	1,002	1,181

**Tabla 6.28:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 3(80% - 20%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	0,556	0,624	0,701	0,712	0,959	
Máximo	0,691	0,812	0,941	1,057	1,009	
Media $(\overline{M})$	0,630	0,729	0,811	0,877	0,979	
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	0,628	0,727	0,808	0,871	0,979	
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,003	0,005	0,012	0,001	
Desviación estándar (S)	0,042	0,051	0,067	0,107	0,026	
Mediana $(M_e)$	0,641	0,730	0,817	0,869	0,969	
Val. min. aceptable	0,588	0,677	0,744	0,770	0,953	
Val. máx. aceptable	0,671	0,780	0,878	0,985	1,005	

**Tabla 6.29:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 4(70% - 30%) en dirección Y.

		Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	0,533	0,644	0,732	0,879	1,082	
Máximo	0,675	0,779	0,895	1,060	1,153	
Media $(\overline{M})$	0,610	0,708	0,824	0,976	1,126	
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	0,609	0,706	0,822	0,975	1,125	
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,002	0,002	0,003	0,001	
Desviación estándar (S)	0,040	0,047	0,048	0,054	0,038	
Mediana $(M_e)$	0,606	0,707	0,840	0,978	1,142	
Val. min. aceptable	0,570	0,661	0,776	0,922	1,087	
Val. máx. aceptable	0,650	0,755	0,871	1,030	1,164	

**Tabla 6.30:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 4<br/>(70% - 30%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,523	0,625	0,694	0,582	0,713
Máximo	0,686	0,784	0,913	1,027	1,260
Media $(\overline{M})$	0,611	0,725	0,820	0,896	0,976
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo})$	0,610	0,724	0,818	0,890	0,965
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,002	0,004	0,010	0,025
Desviación estándar (S)	0,040	0,044	0,064	0,102	0,158
Mediana $(M_e)$	0,621	0,741	0,828	0,924	0,924
Val. min. aceptable	0,571	0,681	0,756	0,794	0,819
Val. máx. aceptable	0,651	0,769	0,885	0,998	1,134

**Tabla 6.31:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 5(60% - 40%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,481	0,592	0,731	0,895	1,074
Máximo	0,670	0,781	0,937	1,016	1,271
Media $(\overline{M})$	0,582	0,685	0,814	0,970	1,176
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	0,580	0,684	0,813	0,970	1,174
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,002	0,002	0,001	0,003
Desviación estándar (S)	0,049	0,046	0,048	0,032	0,054
Mediana $(M_e)$	0,580	0,683	0,812	0,980	1,186
Val. min. aceptable	0,533	0,639	0,766	0,938	1,122
Val. máx. aceptable	0,630	0,731	0,862	1,003	1,230

**Tabla 6.32:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 5(60% - 40%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,499	0,634	0,699	0,742	0,765
Máximo	0,675	0,849	0,951	1,074	1,224
Media $(\overline{M})$	0,616	0,743	0,839	0,932	1,040
Media Geométrica $({ar M}_{geo})$	0,615	0,740	0,836	0,927	1,029
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,004	0,005	0,010	0,027
Desviación estándar (S)	0,046	0,061	0,074	0,100	0,164
Mediana $(M_e)$	0,620	0,758	0,849	0,902	1,031
Val. min. aceptable	0,570	0,681	0,766	0,833	0,877
Val. máx. aceptable	0,662	0,804	0,913	1,032	1,204

**Tabla 6.33:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 6(50% - 50%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,515	0,623	0,772	0,931	1,125
Máximo	0,658	0,765	0,903	1,066	1,217
Media $(\overline{M})$	0,596	0,710	0,843	0,993	1,174
Media Geométrica ( $ar{M}_{geo}$ )	0,595	0,710	0,842	0,992	1,174
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001
Desviación estándar (S)	0,032	0,032	0,035	0,043	0,034
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	0,602	0,717	0,839	0,979	1,179
Val. min. aceptable	0,564	0,678	0,808	0,950	1,140
Val. máx. aceptable	0,628	0,743	0,878	1,036	1,208

**Tabla 6.34:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 6(50% - 50%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,550	0,659	0,729	0,827	0,869
Máximo	0,710	0,834	0,956	1,094	1,202
Media $(\overline{M})$	0,653	0,762	0,848	0,958	1,057
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo})$	0,652	0,761	0,846	0,954	1,051
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,002	0,004	0,008	0,014
Desviación estándar (S)	0,039	0,045	0,059	0,088	0,119
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	0,654	0,775	0,867	0,978	1,076
Val. min. aceptable	0,614	0,717	0,788	0,870	0,938
Val. máx. aceptable	0,692	0,807	0,907	1,046	1,176

**Tabla 6.35:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 7(40% - 60%) en dirección Y.

		Compacta	ación del m	odelo [%]	
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,474	0,594	0,697	0,842	1,041
Máximo	0,688	0,782	0,928	1,104	1,231
Media $(\overline{M})$	0,607	0,718	0,842	0,987	1,156
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	0,605	0,716	0,840	0,985	1,154
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,003	0,002	0,003	0,004	0,004
Desviación estándar (S)	0,053	0,046	0,053	0,060	0,062
Mediana $(M_e)$	0,603	0,731	0,855	0,997	1,170
Val. min. aceptable	0,554	0,671	0,789	0,927	1,094
Val. máx. aceptable	0,661	0,764	0,895	1,047	1,218

**Tabla 6.36:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 7(40% - 60%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,601	0,697	0,598	0,738	0,588
Máximo	0,766	0,847	0,974	1,117	1,254
Media $(\overline{M})$	0,683	0,763	0,849	0,923	0,948
Media Geométrica ( $\overline{M}_{geo}$ )	0,681	0,762	0,843	0,918	0,925
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,002	0,009	0,009	0,046
Desviación estándar (S)	0,043	0,042	0,092	0,095	0,214
Mediana $(M_e)$	0,674	0,755	0,854	0,915	0,962
Val. min. aceptable	0,640	0,721	0,756	0,828	0,734
Val. máx. aceptable	0,726	0,805	0,941	1,018	1,162

Tabla 6.37: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 8(30% - 70%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,544	0,703	0,751	0,952	1,068
Máximo	0,676	0,800	0,951	1,099	1,343
Media $(\overline{M})$	0,622	0,745	0,868	1,022	1,197
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	0,621	0,745	0,867	1,021	1,193
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,002	0,002	0,010
Desviación estándar (S)	0,036	0,028	0,048	0,045	0,100
Mediana $(M_e)$	0,630	0,750	0,868	1,006	1,210
Val. min. aceptable	0,586	0,717	0,820	0,977	1,096
Val. máx. aceptable	0,658	0,773	0,916	1,067	1,297

**Tabla 6.38:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 8(30% - 70%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,593	0,665	0,415	0,802	0,712
Máximo	0,763	0,843	0,945	1,074	1,231
Media $(\overline{M})$	0,669	0,767	0,816	0,935	0,984
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	0,667	0,766	0,806	0,932	0,960
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,002	0,012	0,006	0,068
Desviación estándar (S)	0,043	0,046	0,111	0,078	0,260
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	0,673	0,767	0,850	0,932	1,009
Val. min. aceptable	0,626	0,721	0,705	0,857	0,724
Val. máx. aceptable	0,711	0,813	0,928	1,013	1,244

**Tabla 6.39:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 9(20% - 80%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,557	0,662	0,785	0,949	1,148
Máximo	0,693	0,839	0,976	1,108	1,213
Media $(\overline{M})$	0,634	0,756	0,887	1,044	1,170
Media Geométrica ( $ar{M}_{geo})$	0,633	0,755	0,886	1,044	1,170
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001
Desviación estándar (S)	0,039	0,044	0,048	0,037	0,037
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	0,639	0,766	0,894	1,045	1,150
Val. min. aceptable	0,596	0,712	0,838	1,008	1,133
Val. máx. aceptable	0,673	0,801	0,935	1,081	1,207

**Tabla 6.40:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 9(20% - 80%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,616	0,721	0,737	0,816	1,233
Máximo	0,742	0,862	0,964	1,046	1,233
Media $(\overline{M})$	0,682	0,791	0,866	0,910	1,233
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	0,681	0,790	0,864	0,908	1,233
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,003	0,003	
Desviación estándar (S)	0,037	0,036	0,056	0,059	
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	0,686	0,787	0,886	0,908	1,233
Val. min. aceptable	0,645	0,754	0,810	0,851	1,233
Val. máx. aceptable	0,719	0,827	0,922	0,969	1,233

Tabla 6.41: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 10<br/>(10% - 90%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,524	0,645	0,798	0,955	1,161
Máximo	0,682	0,819	0,957	1,108	1,161
Media $(\overline{M})$	0,609	0,737	0,876	1,041	1,161
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	0,607	0,736	0,875	1,040	1,161
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,003	0,002	0,002	
Desviación estándar (S)	0,044	0,051	0,040	0,048	
Mediana $(M_e)$	0,614	0,746	0,875	1,048	1,161
Val. min. aceptable	0,565	0,687	0,836	0,993	1,161
Val. máx. aceptable	0,653	0,788	0,916	1,089	1,161

**Tabla 6.42:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 10<br/>(10% - 90%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,550	0,701	0,707	0,822	0,900
Máximo	0,790	0,868	0,962	1,039	1,081
Media $(\overline{M})$	0,660	0,790	0,858	0,927	0,999
Media Geométrica $(\overline{M}_{geo})$	0,657	0,789	0,855	0,925	0,996
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,004	0,002	0,004	0,004	0,005
Desviación estándar (S)	0,060	0,040	0,067	0,061	0,073
Mediana $(M_e)$	0,656	0,790	0,872	0,925	1,009
Val. min. aceptable	0,599	0,750	0,791	0,866	0,925
Val. máx. aceptable	0,720	0,830	0,925	0,987	1,072

Tabla 6.43: Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 11(0% - 100%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	0,553	0,676	0,840	0,996	1,130	
Máximo	0,756	0,875	1,050	1,155	1,290	
Media $(\overline{M})$	0,629	0,759	0,909	1,074	1,218	
Media Geométrica ( $ar{M}_{geo}$ )	0,626	0,757	0,908	1,073	1,217	
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	
Desviación estándar (S)	0,058	0,050	0,048	0,043	0,053	
Mediana $(M_e)$	0,622	0,746	0,909	1,074	1,228	
Val. min. aceptable	0,571	0,709	0,861	1,031	1,165	
Val. máx. aceptable	0,687	0,808	0,958	1,117	1,271	

**Tabla 6.44:** Valores estadísticos de conductividad térmica por la curva granulométrica 11(0% - 100%) en dirección X.

# 6.2.4 Análisis estadístico para la difusividad térmica ( $\alpha$ )

A continuación, en las tablas de 6.45 a 6.66, se presentan los resultados del análisis estadístico para los resultados de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) obtenidos en el capítulo cinco. Indican también los valores mínimos y máximos que pueden ser aceptados. Los valores están calculados con las ecuaciones presentadas anteriormente por cada curva granulométrica. En el caso de la difusividad térmica, se presentan también los resultados en las dos direcciones principales X e Y ya que esta propiedad se ve influenciada por la dirección del flujo de calor.

	Compactación del modelo [%]						
Dato	5	10	15	20	25		
Mínimo	0,333	0,431	0,446	0,471	0,524		
Máximo	0,545	0,568	0,596	0,603	0,630		
Media $(\overline{M})$	0,452	0,507	0,534	0,536	0,565		
Media Geométrica	0,448	0,506	0,533	0,535	0,564		
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,003	0,001	0,001	0,002	0,001		
Desviación estándar (S)	0,057	0,035	0,038	0,040	0,039		
Mediana $(M_e)$	0,462	0,512	0,536	0,535	0,566		
Val. min. aceptable	0,395	0,472	0,496	0,496	0,527		
Val. máx. aceptable	0,508	0,542	0,572	0,576	0,604		

**Tabla 6.45:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 1 (100% - 0%)<br/>en dirección Y.

		Compactación del modelo [%]						
Dato	5	10	15	20	25			
Mínimo	0,313	0,362	0,445	0,516	0,635			
Máximo	0,454	0,544	0,619	0,683	0,709			
Media ( <i>M</i> )	0,410	0,483	0,545	0,615	0,686			
Media Geométrica	0,409	0,481	0,543	0,614	0,685			
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001			
Desviación estándar (S)	0,034	0,042	0,042	0,042	0,032			
Mediana $(M_e)$	0,418	0,483	0,540	0,620	0,702			
Val. min. aceptable	0,376	0,442	0,503	0,574	0,654			
Val. máx. aceptable	0,444	0,525	0,587	0,657	0,717			

**Tabla 6.46:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 1 (100% - 0%)<br/>en dirección X.

	Compactación del modelo [%]						
Dato	5	10	15	20	25		
Mínimo	0,391	0,444	0,459	0,437	0,468		
Máximo	0,523	0,555	0,564	0,619	0,660		
Media $(\overline{M})$	0,442	0,490	0,513	0,543	0,569		
Media Geométrica	0,441	0,489	0,512	0,541	0,565		
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,002	0,004		
Desviación estándar (S)	0,031	0,027	0,033	0,047	0,066		
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	0,439	0,482	0,519	0,549	0,579		
Val. min. aceptable	0,411	0,463	0,480	0,496	0,503		
Val. máx. aceptable	0,473	0,517	0,546	0,590	0,635		

**Tabla 6.47:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 2 (90% - 10%)<br/>en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	0,337	0,387	0,417	0,516	0,628	
Máximo	0,488	0,527	0,635	0,654	0,726	
Media $(\overline{M})$	0,412	0,464	0,530	0,589	0,669	
Media Geométrica	0,411	0,463	0,528	0,588	0,668	
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001	
Desviación estándar (S)	0,036	0,039	0,045	0,040	0,033	
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	0,408	0,467	0,534	0,578	0,672	
Val. min. aceptable	0,377	0,425	0,485	0,549	0,635	
Val. máx. aceptable	0,448	0,503	0,575	0,629	0,702	

**Tabla 6.48:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 2 (90% - 10%)<br/>en dirección X.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,354	0,411	0,428	0,409	0,420
Máximo	0,446	0,513	0,585	0,630	0,684
Media ( <i>M</i> )	0,414	0,472	0,515	0,536	0,581
Media Geométrica	0,414	0,471	0,513	0,532	0,574
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,000	0,001	0,002	0,004	0,008
Desviación estándar (S)	0,021	0,027	0,040	0,065	0,088
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	0,414	0,471	0,519	0,542	0,575
Val. min. aceptable	0,393	0,445	0,475	0,471	0,493
Val. máx. aceptable	0,436	0,499	0,554	0,601	0,668

**Tabla 6.49:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 3 (80% - 20%)<br/>en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,385	0,428	0,484	0,541	0,589
Máximo	0,474	0,571	0,604	0,660	0,686
Media ( $\overline{M}$ )	0,417	0,471	0,532	0,582	0,641
Media Geométrica	0,417	0,470	0,531	0,581	0,641
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Desviación estándar (S)	0,026	0,033	0,029	0,030	0,033
Mediana $(M_e)$	0,417	0,471	0,529	0,585	0,649
Val. min. aceptable	0,391	0,438	0,502	0,552	0,609
Val. máx. aceptable	0,444	0,504	0,561	0,613	0,674

**Tabla 6.50:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 3 (80% - 20%)en dirección X.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,406	0,434	0,460	0,441	0,560
Máximo	0,499	0,556	0,607	0,644	0,579
Media ( $\overline{M}$ )	0,455	0,499	0,525	0,535	0,566
Media Geométrica	0,454	0,498	0,523	0,532	0,566
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,002	0,004	0,000
Desviación estándar (S)	0,029	0,034	0,042	0,063	0,011
Mediana $(M_e)$	0,463	0,499	0,530	0,530	0,560
Val. min. aceptable	0,425	0,465	0,483	0,472	0,555
Val. máx. aceptable	0,484	0,533	0,567	0,599	0,577

**Tabla 6.51:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 4 (70% - 30%)<br/>en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,384	0,442	0,472	0,540	0,626
Máximo	0,488	0,534	0,578	0,645	0,666
Media $(\overline{M})$	0,441	0,485	0,533	0,596	0,651
Media Geométrica	0,440	0,484	0,532	0,595	0,651
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
Desviación estándar (S)	0,028	0,032	0,031	0,032	0,022
Mediana $(M_e)$	0,436	0,484	0,539	0,601	0,662
Val. min. aceptable	0,412	0,453	0,502	0,564	0,629
Val. máx. aceptable	0,469	0,517	0,565	0,628	0,674

**Tabla 6.52:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 4 (70% - 30%)<br/>en dirección X.

		Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	0,382	0,432	0,450	0,371	0,430	
Máximo	0,495	0,548	0,609	0,641	0,741	
Media $(\overline{M})$	0,449	0,505	0,540	0,556	0,572	
Media Geométrica	0,449	0,504	0,538	0,552	0,567	
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,002	0,004	0,007	
Desviación estándar (S)	0,029	0,035	0,046	0,061	0,087	
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	0,456	0,513	0,542	0,570	0,550	
Val. min. aceptable	0,420	0,470	0,493	0,495	0,486	
Val. máx. aceptable	0,479	0,540	0,586	0,617	0,659	

**Tabla 6.53:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 5 (60% - 40%)<br/>en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,359	0,409	0,477	0,551	0,618
Máximo	0,500	0,552	0,625	0,631	0,747
Media $(\overline{M})$	0,428	0,477	0,535	0,602	0,690
Media Geométrica	0,426	0,476	0,534	0,602	0,690
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001
Desviación estándar (S)	0,035	0,032	0,033	0,022	0,033
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	0,425	0,474	0,535	0,609	0,685
Val. min. aceptable	0,393	0,445	0,502	0,580	0,657
Val. máx. aceptable	0,463	0,509	0,568	0,624	0,724

**Tabla 6.54:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 5 (60% - 40%)en dirección X.

		Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	0,362	0,435	0,453	0,454	0,443	
Máximo	0,486	0,581	0,613	0,651	0,697	
Media ( <i>M</i> )	0,445	0,508	0,542	0,568	0,595	
Media Geométrica	0,444	0,507	0,540	0,565	0,588	
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,002	0,002	0,004	0,008	
Desviación estándar (S)	0,033	0,041	0,047	0,060	0,090	
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	0,447	0,518	0,548	0,550	0,589	
Val. min. aceptable	0,412	0,467	0,496	0,508	0,504	
Val. máx. aceptable	0,478	0,550	0,589	0,628	0,685	

**Tabla 6.55:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 6 (50% - 50%)<br/>en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	0,371	0,426	0,497	0,569	0,642	
Máximo	0,475	0,523	0,585	0,649	0,693	
Media ( $\overline{M}$ )	0,430	0,486	0,545	0,605	0,672	
Media Geométrica	0,430	0,486	0,544	0,605	0,671	
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	
Desviación estándar (S)	0,023	0,022	0,023	0,026	0,018	
Mediana $(M_e)$	0,434	0,490	0,541	0,599	0,673	
Val. min. aceptable	0,407	0,464	0,522	0,579	0,654	
Val. máx. aceptable	0,454	0,508	0,567	0,631	0,689	

**Tabla 6.56:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 6 (50% - 50%)en dirección X.

		Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	0,398	0,451	0,479	0,505	0,498	
Máximo	0,513	0,570	0,616	0,666	0,690	
Media ( $\overline{M}$ )	0,472	0,522	0,548	0,585	0,606	
Media Geométrica	0,471	0,521	0,547	0,583	0,603	
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,003	0,004	
Desviación estándar (S)	0,028	0,030	0,037	0,055	0,067	
Mediana $(M_e)$	0,475	0,531	0,560	0,597	0,614	
Val. min. aceptable	0,444	0,491	0,511	0,530	0,540	
Val. máx. aceptable	0,500	0,552	0,586	0,640	0,673	

**Tabla 6.57:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 7 (40% - 60%)<br/>en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,338	0,401	0,446	0,512	0,597
Máximo	0,497	0,534	0,600	0,674	0,705
Media ( $\overline{M}$ )	0,439	0,491	0,544	0,603	0,663
Media Geométrica	0,437	0,490	0,543	0,602	0,662
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
Desviación estándar (S)	0,039	0,033	0,035	0,036	0,034
Mediana $(M_e)$	0,438	0,500	0,553	0,607	0,670
Val. min. aceptable	0,400	0,459	0,510	0,567	0,629
Val. máx. aceptable	0,478	0,524	0,579	0,639	0,697

**Tabla 6.58:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 7 (40% - 60%)<br/>en dirección X.

		Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25	
Mínimo	0,434	0,477	0,389	0,452	0,360	
Máximo	0,554	0,580	0,629	0,679	0,715	
Media $(\overline{M})$	0,493	0,522	0,549	0,562	0,548	
Media Geométrica	0,492	0,522	0,546	0,560	0,537	
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,003	0,003	0,013	
Desviación estándar (S)	0,031	0,029	0,059	0,057	0,115	
Mediana $(M_e)$	0,487	0,517	0,552	0,557	0,551	
Val. min. aceptable	0,462	0,494	0,490	0,506	0,433	
Val. máx. aceptable	0,524	0,551	0,608	0,619	0,662	

**Tabla 6.59:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 8 (30% - 70%)<br/>en dirección Y.

		Compactación del modelo [%]					
Dato	5	10	15	20	25		
Mínimo	0,393	0,482	0,488	0,582	0,614		
Máximo	0,489	0,549	0,614	0,671	0,769		
Media $(\overline{M})$	0,450	0,510	0,562	0,623	0,694		
Media Geométrica	0,449	0,510	0,561	0,622	0,692		
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,000	0,001	0,001	0,003		
Desviación estándar (S)	0,026	0,019	0,031	0,027	0,052		
Mediana ( <i>M<sub>e</sub></i> )	0,455	0,514	0,561	0,614	0,694		
Val. min. aceptable	0,424	0,491	0,531	0,596	0,642		
Val. máx. aceptable	0,476	0,529	0,593	0,650	0,746		

**Tabla 6.60:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 8 (30% - 70%)en dirección X.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,430	0,457	0,290	0,494	0,418
Máximo	0,551	0,575	0,599	0,640	0,702
Media ( <i>M</i> )	0,483	0,525	0,528	0,569	0,568
Media Geométrica	0,482	0,524	0,523	0,568	0,555
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,004	0,002	0,020
Desviación estándar (S)	0,031	0,031	0,067	0,045	0,142
Mediana $(M_e)$	0,485	0,526	0,548	0,565	0,583
Val. min. aceptable	0,452	0,494	0,462	0,524	0,425
Val. máx. aceptable	0,514	0,556	0,595	0,615	0,710

**Tabla 6.61:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 9 (20% - 80%)<br/>en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,404	0,455	0,510	0,581	0,655
Máximo	0,501	0,574	0,630	0,675	0,701
Media ( $\overline{M}$ )	0,458	0,517	0,575	0,636	0,677
Media Geométrica	0,457	0,517	0,575	0,636	0,677
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001
Desviación estándar (S)	0,027	0,030	0,028	0,022	0,023
Mediana $(M_e)$	0,462	0,524	0,578	0,637	0,674
Val. min. aceptable	0,431	0,487	0,547	0,614	0,654
Val. máx. aceptable	0,485	0,547	0,603	0,658	0,700

**Tabla 6.62:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 9 (20% - 80%)en dirección X.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,447	0,495	0,479	0,500	0,705
Máximo	0,535	0,588	0,622	0,637	0,705
Media ( $\overline{M}$ )	0,493	0,541	0,560	0,555	0,705
Media Geométrica	0,492	0,541	0,559	0,554	0,705
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,001	
Desviación estándar (S)	0,026	0,024	0,036	0,035	
Mediana $(M_e)$	0,496	0,538	0,575	0,553	0,705
Val. min. aceptable	0,467	0,517	0,524	0,520	0,705
Val. máx. aceptable	0,519	0,566	0,596	0,590	0,705

**Tabla 6.63:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 10<br/>(10% - 90%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,380	0,442	0,521	0,587	0,664
Máximo	0,494	0,560	0,618	0,674	0,664
Media ( $\overline{M}$ )	0,440	0,505	0,567	0,635	0,664
Media Geométrica	0,439	0,503	0,567	0,634	0,664
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,001	
Desviación estándar (S)	0,031	0,034	0,025	0,028	
Mediana $(M_e)$	0,443	0,511	0,565	0,638	0,664
Val. min. aceptable	0,409	0,470	0,542	0,607	0,664
Val. máx. aceptable	0,472	0,539	0,592	0,663	0,664

**Tabla 6.64:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 10<br/>(10% - 90%) en dirección X.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,397	0,479	0,457	0,503	0,519
Máximo	0,573	0,596	0,624	0,633	0,622
Media ( $\overline{M}$ )	0,477	0,542	0,556	0,566	0,575
Media Geométrica	0,475	0,541	0,554	0,565	0,574
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002
Desviación estándar (S)	0,044	0,028	0,042	0,036	0,042
Mediana $(M_e)$	0,475	0,542	0,565	0,565	0,581
Val. min. aceptable	0,433	0,514	0,513	0,530	0,533
Val. máx. aceptable	0,522	0,569	0,598	0,602	0,616

**Tabla 6.65:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 11(0% - 100%) en dirección Y.

	Compactación del modelo [%]				
Dato	5	10	15	20	25
Mínimo	0,401	0,463	0,546	0,609	0,654
Máximo	0,546	0,598	0,679	0,702	0,739
Media ( $\overline{M}$ )	0,455	0,520	0,589	0,656	0,701
Media Geométrica	0,453	0,519	0,588	0,655	0,701
Varianza (S <sup>2</sup> )	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
Desviación estándar (S)	0,042	0,034	0,030	0,025	0,028
Mediana $(M_e)$	0,449	0,510	0,588	0,653	0,707
Val. min. aceptable	0,413	0,487	0,559	0,630	0,673
Val. máx. aceptable	0,497	0,554	0,619	0,681	0,730

**Tabla 6.66:** Valores estadísticos de difusividad térmica por la curva granulométrica 11(0% - 100%) en dirección X.

### 6.3 Determinación de la recta tendencia

Una de las relaciones más comunes entre dos variables experimentales es la lineal, donde el diseño de una variable (en el eje X) contra otra (en el eje Y) se aproxima a la tendencia de una línea recta. Para encontrar la relación matemática entre estas variables X e Y, se necesita una ecuación para la línea que mejor encaje con los datos experimentales obtenidos en el capítulo cinco. La ecuación de esa línea se presenta en la ecuación 6.9.

$$Y = m * x + b \tag{6.9}$$

Donde *m* es su pendiente y *b* es donde la recta tendencia intercepta con el eje Y. para determinar la recta tendencia hay dos diferentes métodos, el método lineal y el método de los mínimos cuadrados. Se ha decidido utilizar el método de los mínimos para el cálculo de la recta tendencia porqué permite en primer lugar hallar la ecuación de la recta tendencia, y en segundo lugar, a través de los mínimos cuadrados, permite apreciar la calidad de los resultados obtenidos [43].

Este método es una aproximación que nos permite representar un grupo de datos mediante una sola función. Además del valor del error cuadrático, nos permite determinar la calidad de la recta. De hecho si el valor del error está cerca de 1, la calidad de aproximación de la recta tendencia es elevada, y a la inversa, la recta tendencia describe de manera más aproximada el andamiento de los datos experimentales.

Para describir el andamiento de los resultados mostrados en el capítulo cinco, se ha decidido utilizar una aproximación lineal, con la ecuación 6.9. El método de los mínimos cuadrados, calcula la recta que pasa por la media de todas las observaciones representadas por  $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_i, y_i)$ , por lo tanto, la recta tendencia tendrá una ecuación como se muestra en la ecuación 6.10.

$$Y = m * (x - \bar{x}) + \bar{y}$$
 (6.10)

Donde  $\bar{y}$  es la media de todas las observaciones  $y_1, y_2, y_3, ..., y_i$ , i  $\bar{x}$  es la media de todas las observaciones  $x_1, x_2, x_3, ..., x_i$ . Además se puede calcular el coeficiente de la pendencia de la recta tendencia m a través de la ecuación 6.11. Una vez determinados los parámetros anteriores, se pasa a calcular el coeficiente de pendencia de la recta (m). Se utiliza la ecuación 6.11, proveniente de la geometría analítica.

$$m = \frac{\sum (x - \bar{x}) * \sum (y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2}$$
(6.11)

Una vez determinada la ecuación de la recta es necesario el error que se hace en la aproximación, es decir calcular la desviación estándar. La desviación estándar se define por

la ecuación 6.12 y es la diferencia entre el valor real de la serie y el valor estimado por la recta de tendencia. Además se define el residuo como la suma de las desviaciones estándar medias, y se calcula a través de la ecuación 6.13.

$$R_i^2 = (y_i - y * (x_i))^2$$
(6.12)

$$R^{2} = \sum_{i=1}^{n} (y_{i} - y * (x_{i}))^{2}$$
(6.13)

El valor de desviación estándar nos deja un parámetro para evaluar la calidad de la recta tendencia. De hecho, cuando el valor de desviación estándar es uno ( $R^2 = 1$ ), la aproximación de la recta tendencia es óptima, describe cada punto sin cometer errores. En lugar, cuando el valor de desviación estándar está muy lejos de 1, la aproximación es muy elevada, esto puede ser debido al hecho que los valores experimentales tienen una elevada incertitud. Siendo que se utilizan valores experimentales, y por lo tanto con un cierto nivel de errores, se admiten como buenas aproximaciones, aquellas rectas de tendencias que tienen un valor de desviación estándar que se acerca a uno. A continuación se presentan las figuras depuradas de los "outliers", como se ha visto anteriormente, y la recta tendencia para cada curva granulométrica. Se analizan, como anteriormente, todos los resultados obtenidos por cada propiedad térmica, es decir densidad ( $\rho$ ), calor específico ( $C_t$ ), conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) y difusividad térmica ( $\alpha$ ).

## 6.3.1 Recta tendencia para la densidad ( $\rho$ )

De la figura a la 6.1 a la 6.11, se presentan las diferentes rectas de tendencia obtenidas para las diferentes curvas granulométricas. Además, en las figuras se destacan las ecuaciones de las rectas de tendencia y también la desviación estándar que se ha obtenido después de la modelización. Para la propiedad de densidad ( $\rho$ ), no se analizan las dos direcciones principales porque esta propiedad no se ve influenciada por la dirección del flujo de calor.



**Figura 6.1:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 1 (100% - 0%).



**Figura 6.2:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 2 (90% - 10%).



**Figura 6.3:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 3 (80% - 20%).



**Figura 6.4:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 4 (70% - 30%).



**Figura 6.5:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 5 (60% - 40%).



**Figura 6.6:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 6 (50% - 50%).



**Figura 6.7:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 7 (40% - 60%).



**Figura 6.8:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 8 (30% - 70%).



**Figura 6.9:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 9 (20% - 80%).



**Figura 6.10:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 10 (10% - 90%).



**Figura 6.11:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 11 (0% - 100%).

### **Consideraciones**

Como se puede ver en las figuras presentadas anteriormente (de figura 6.1 a 6.11), los resultados experimentales obtenidos a través del modelo, son buenos. De hecho, observan la desviación estándar de cada curva granulométrica, se puede apreciar que este parámetro esta siempre muy cercano a 1. Además se puede ver en las figuras que no existe una dispersión especialmente grande de los resultados.

Por lo tanto, es posible calcular las ecuaciones de las rectas de tendencia con una buena aproximación al andamiento real de los modelos descritos anteriormente. En conclusión se puede decir que la densidad en el HoPo puede ser representada en una recta con una buena aproximación a la realidad. La densidad aumentará a medida que aumenta el grado de compactación del modelo.

En las ecuaciones de las rectas de tendencia, está representado la variación de la densidad al variar el grado de compactación. De hecho, los valores "y" de la recta representan los valores de densidad del modelo simulado y, los valores "x" representan el grado de compactación del modelo. Analizando las ecuaciones, se puede decir que la densidad del HoPo depende del grado de compactación, estando el coeficiente de inclinación de la recta multiplicado por el valor de compactación que asume el modelo.

# 6.3.2 Recta tendencia para calor específico $(C_t)$

A continuación, de figura la 6.12 a la 6.22, se presentan las diferentes rectas de tendencia obtenidas para las diferentes curvas granulométricas. Además, en las figuras, se indican las ecuaciones de las rectas de tendencia y también la desviación estándar que se han obtenido después de la modelización. Para la propiedad de calor específico ( $C_t$ ), no se analizan las dos direcciones principales porque esta propiedad no se ve influenciada por la dirección del flujo de calor.



**Figura 6.12:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 1 (100% - 0%).



**Figura 6.13:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 2 (90% - 10%).



**Figura 6.14:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 3 (80% - 20%).


**Figura 6.15:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 4 (70% - 30%).







**Figura 6.17:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 6 (50% - 50%).



**Figura 6.18:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 7 (40% - 60%).



**Figura 6.19:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 8 (30% - 70%).



**Figura 6.20:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 9 (20% - 80%).



**Figura 6.21:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 10 (10% - 90%).



**Figura 6.22:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 11 (0% - 100%).

Como se puede ver en las figuras presentadas anteriormente (de figura 6.11 a 6.22), los resultados experimentales obtenidos a través del modelo, son buenos. De hecho, viendo la desviación estándar de cada curva granulométrica, se puede apreciar que este parámetro esta siempre muy cercano a 1, pero el valor de la desviación estándar no es tan cercano a uno como la propiedad de densidad presentada anteriormente. De hecho se puede apreciar una mayor dispersión en los datos, es decir, una mayor incertidumbre aunque limitada, en la determinación de los valores.

Esta incertidumbre puede ser debida al hecho que el calor específico  $(C_t)$  es una propiedad que necesita ser calculada. Por lo tanto, si hay algún error en los modelos generados, cuando se multiplican estos datos, el error aumenta. Pero, este error es razonable, de hecho, el valor de la desviación estándar está siempre muy cercano a uno. Por lo tanto, es posible calcular las ecuaciones de las rectas de tendencia con una buena aproximación al andamiento real de los modelos descritos anteriormente.

En conclusión se puede decir que el calor específico ( $C_t$ ) en el HoPo puede ser representado por una recta con una buena aproximación a la realidad. El calor específico de los modelos disminuirá a medida que aumenta el grado de compactación del modelo. Sin embargo, se puede ver desde las figuras 6.11 a la 6.22, que la variación de los valores de calor específico no varía significativamente al variar el grado de compactación. La variación se queda en el orden de la tercera cifra decimal, y por lo tanto, es despreciable. Por lo tanto, se puede considerar el calor específico ( $C_t$ ) del HoPo como una propiedad que no varía con la variación del grado de compactación.

En las ecuaciones de las rectas de tendencia presentadas anteriormente, está representada la variación del calor específico al variar el grado de compactación. De hecho, los valores "y" de la recta representan los valores del calor específico del modelo simulado. Al revés, los valores "x" representan el grado de compactación del modelo. Analizando las ecuaciones, se puede decir que el calor específico del HoPo depende del grado de compactación, estando el coeficiente de inclinación de la recta multiplicado por el valor de compactación que asume el modelo. Se debe indicar que esta dependencia es muy débil. Por lo tanto, como se ha destacado anteriormente, el valor del calor específico está prácticamente constante.

### 6.3.3 Recta tendencia para la conductividad térmica ( $\lambda_e$ )

Posteriormente, de la figura 6.23 a la 6.44, se presentan las diferentes rectas de tendencia obtenidas para las diferentes curvas granulométricas. Además, en las figuras, se indican las ecuaciones de las rectas de tendencia y también la desviación estándar que se ha obtenido después de la modelización. Para la propiedad de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ), se analizarán los modelos en las dos direccione principales, es decir X e Y. La razón es que la conductividad térmica, como se indica en los capítulos anteriores, está influenciada por la dirección del flujo de calor.



**Figura 6.23:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 1 (100% - 0%) en dirección X.



**Figura 6.24:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 1 (100% - 0%) en dirección Y.



Figura 6.25: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 2 (90% - 10%) en dirección X.



**Figura 6.26:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 2 (90% - 10%) en dirección Y.



Figura 6.27: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 3 (80% - 20%) en dirección X.



Figura 6.28: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 3 (80% - 20%) en dirección Y.



**Figura 6.29:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 4 (70% - 30%) en dirección X.



**Figura 6.30:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 4 (70% - 30%) en dirección Y.



**Figura 6.31:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 5 (60% - 40%) en dirección X.



**Figura 6.32:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 5 (60% - 40%) en dirección Y.







**Figura 6.34:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 6 (50% - 50%) en dirección Y.



**Figura 6.35:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 7 (40% - 60%) en dirección X.



**Figura 6.36:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 7 (40% - 60%) en dirección Y.



Figura 6.37: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 8 (30% - 70%) en dirección X.



**Figura 6.38:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 8 (30% - 70%) en dirección Y.







**Figura 6.40:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 9 (20% - 80%) en dirección Y.



**Figura 6.41:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 10 (10% - 90%) en dirección X.



**Figura 6.42:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 10 (10% - 90%) en dirección Y.



**Figura 6.43:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 11 (0% - 100%) en dirección X.



**Figura 6.44:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 11 (0% - 100%) en dirección Y.

Como se observa en las figuras presentadas anteriormente (de figura 6.23 a 6.44), los resultados experimentales obtenidos a través del modelo son buenos, pero, todavía tienen una incertitud mayor de los datos presentados anteriormente. De hecho, mirando la desviación estándar de cada curva granulométrica, se puede apreciar que este parámetro esta siempre muy cercano a 1 cuando el flujo de calor se presenta en la dirección X, pero, en el caso en que el flujo de calor se represente en la dirección Y, el valor de desviación estándar no está tan cercano a 1 como en el caso anterior.

De hecho se puede apreciar una mayor dispersión en los datos, es decir, una mayor incertitud, aunque limitada, en la determinación de los valores. La dispersión mayor, y por lo tanto la mayor incertitud sobre los resultados de los modelos, se observa principalmente en los modelos con el flujo de calor en dirección Y. Esto es debido al hecho que la dirección de compresión es en dirección Y, y por lo tanto, la medida del modelo varia solamente en esta dimensión. Al revés, en dirección X, las dimensiones de los modelos quedan inalteradas, y por lo tanto, los resultados de los modelos presentan un menor grado de dispersión.

Además, en todos los modelos, se puede ver que la dispersión de los resultados aumenta a medida que aumenta el grado de compactación. De hecho, se puede apreciar un aumento particular de la incertidumbre de los resultados por el grado de compactación de 25%. Esto es debido principalmente al hecho que el modelo que viene creado por este nivel de compactación, presenta una mayor incertitud a lo que se refiere a los contactos entre las partículas. Pero, principalmente, se debe al hecho que un número poco elevado puede alcanzar el nivel de compactación de 25%, y por eso se obtiene un número inferior de valores, lo que hace más difícil depurar los resultados obtenidos de los "outliers".

Esta incertidumbre, no es tan grande que no permita determinar la recta tendencia. Por lo tanto, se puede calcular la línea que describe el andamiento de la conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) por cada curva granulométrica con una buena aproximación. De hecho, los valores de desviación estándar, son muy cercanos a 1 para la dirección X y ligeramente distantes de 1 para la dirección Y. Estos valores se quedan en un intervalo de errores aceptables.

En general, las ecuaciones de las rectas de tendencia en las dos direccione principales presentadas anteriormente, representan la variación de la conductividad térmica con la variación del grado de compactación. De hecho, los valores "y" de la recta representan los valores de la conductividad térmica del modelo simulado. Al revés, los valores "x" representan el grado de compactación del modelo.

En conclusión, la conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) en el HoPo puede ser representada en una recta con una óptima aproximación a la realidad en la dirección X, y con una buena aproximación a lo que se refiere a la dirección Y. La conductividad térmica de los modelos aumentará a medida que aumenta el grado de compactación del modelo. También en este caso, el andamiento de la conductividad térmica puede ser representado en una recta.

La variación de los valores de conductividad térmica al variar el nivel de compactación es bastante significativo, por lo tanto el comportamiento no puede ser simplificado a un andamiento constante. La conductividad térmica, de acuerdo con la revisión de la literatura, aumenta al aumentar el grado de compactación, porqué aumentan de manera significativa los contactos entre las partículas y quedan siempre menos vacíos en el interior del modelo.

# 6.3.4 Recta tendencia para la difusividad térmica ( $\alpha$ )

Desde la figura 6.45 a la 6.66, se presentan las diferentes rectas de tendencia obtenidas para las diferentes curvas granulométricas. Además, en las figuras, indican las ecuaciones de las rectas de tendencia y también la desviación estándar que se ha obtenido después de la modelización. Para la propiedad de difusividad térmica ( $\alpha$ ), se analizarán los modelos en las dos direccione principales, es decir X e Y. Esto es debido a que la difusión térmica, como se ha señalado en los capítulos anteriores, está influenciada por la dirección del flujo de calor.



**Figura 6.45:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 1 (100% - 0%) en dirección X.



**Figura 6.46:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 1 (100% - 0%) en dirección Y.



**Figura 6.47:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 2 (90% - 10%) en dirección X.



**Figura 6.48:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 2 (90% - 10%) en dirección Y.







**Figura 6.50:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 3 (80% - 20%) en dirección Y.







**Figura 6.52:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 4 (70% - 30%) en dirección Y.







**Figura 6.54:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 5 (60% - 40%) en dirección Y.



Figura 6.55: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 6 (50% - 50%) en dirección X.



**Figura 6.56:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 6 (50% - 50%) en dirección Y.







**Figura 6.58:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 7 (40% - 60%) en dirección Y.



**Figura 6.59:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 8 (30% - 70%) en dirección X.



**Figura 6.60:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 8 (30% - 70%) en dirección Y.



**Figura 6.61:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 9 (20% - 80%) en dirección X.



Figura 6.62: Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 9 (20% - 80%) en dirección Y.







**Figura 6.64:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 10 (10% - 90%) en dirección Y.







**Figura 6.66:** Representación de la recta tendencia, su ecuación y su desviación estándar por la curva granulométrica 11 (0% - 100%) en dirección Y.

Como se observa en las figuras presentadas anteriormente (de figura 6.45 a 6.66), los resultados experimentales obtenidos a través del modelo tienen una incertidumbre mayor de los resultados presentados anteriormente. En particular, la incertidumbre mayor, se presenta como anteriormente, en los modelos con el flujo de calor en dirección Y. De hecho, la desviación estándar de las curvas granulométricas de los modelos con flujo de calor en dirección Y, se queda entre los valores de 0,4 y 0,8.

Por lo tanto se puede decir que es todavía posible describir el andamiento de la difusividad térmica a través de una recta. Haciendo esta simplificación, sin embargo, se admite de un error de evaluación de la difusividad térmica cuando el flujo de calor es en dirección Y, es decir en la misma dirección de la carga de compactación.

Cuando el flujo de calor se encuentra en dirección X, es decir en dirección perpendicular a la carga de compactación, el andamiento de la difusión térmica es aceptado con una buena aproximación a una recta. El error que se hace en los cálculos en dirección Y, sin embargo, puede ser descuidado.

Como para la conductividad térmica, se puede obtener una mayor dispersión en los datos, es decir, una mayor incertitud, en la determinación de los valores. A una dispersión mayor, hay una mayor incertitud sobre los resultados de los modelos. Esto es debido al

hecho que la dirección de compresión es en dirección Y, y por lo tanto, la medida del modelo varia solamente en esta dimensión. Al revés, en dirección X, las dimensiones de los modelos quedan inalteradas, y por lo tanto, los resultados de los modelos presentan un menor grado de dispersión.

Esta incertitud, no es tan grande que no permita determinar la recta tendencia. Por lo tanto, se puede calcular la línea que describe el andamiento de la difusividad térmica ( $\alpha$ ) para cada curva granulométrica con una buena aproximación. De hecho, los valores de desviación estándar, están muy cercanos a 1 para la dirección X y levemente distantes a 1 para la dirección Y. Estos valores se encuentran en un intervalo de errores aceptables.

En general, las ecuaciones de las rectas de tendencia en las dos direccione principales presentadas anteriormente, representan la variación de la difusividad térmica al variar el grado de compactación. De hecho, los valores "y" de la recta representan los valores de la difusividad térmica del modelo simulado. Al revés, los valores "x" representan el grado de compactación del modelo.

En conclusión se puede decir que la difusividad térmica ( $\alpha$ ) en el HoPo puede ser representada con una recta con una muy buena aproximación a la realidad en la dirección X, y con una buena aproximación por lo que se refiere a la dirección Y. La difusividad térmica, como la conductividad térmica, de los modelos aumentará a medida que aumenta el grado de compactación del modelo.

### 6.4 Comparación de las rectas de tendencia

Los resultados que se han obtenido, son específicos para cada curva granulométrica, pero, a partir de las figuras anteriores, no es sencillo entender el andamiento general de las diferentes propiedades. Con el propósito de entender de manera más directa el andamiento es necesario comparar los diferentes resultados en figuras de resumen. Posteriormente se analizaran las propiedades presentadas anteriormente de calor especifico (C<sub>t</sub>), densidad ( $\rho$ ), conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) y difusividad térmica ( $\alpha$ ) del HoPo.

## 6.4.1 Calor específico ( $C_t$ )

En figura 6.67, se presenta el andamiento del calor específico para todas las curvas que se han analizado. Como se ha destacado anteriormente, el andamiento de las curvas no está influenciado por la dirección del flujo de calor, siendo el calor específico una propiedad que no varía con la dirección del calor en el modelo.



Figura 6.67: Comparación de las rectas de tendencia de todas las curvas granulométrica por la propiedad de calor específico (Ct).

### **Consideraciones**

Como se puede observar en la figura 6.67, todas las rectas de tendencia calculadas anteriormente, tienen la misma ecuación. Además se puede ver que la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo es muy pequeño, del orden de 0,020 J/kgK. Por lo tanto se

puede decir que el andamiento del calor específico en el HoPo es constante, y puede ser descrito por la ecuación 6.14.

$$y = 872,85$$
 [J/kgK] (6.14)

Con la simplificación presentada con la ecuación 6.14, es posible decir que la variación del valor de calor específico entre las diferentes curvas granulométricas de este estudio, es nada. Por lo tanto se puede decir que el calor específico no varía con el variar de las curvas granulométricas.

Existe, como se ha destacado anteriormente, una pequeña variación en los valores al variar el nivel de compactación. Pero, a través de las consideraciones que se han hecho anteriormente, es posible decir que el nivel de compactación no varía de manera significativa respecto al valor de calor específico de los modelos en estudio. Por lo tanto con los resultados obtenidos, se puede decir que el calor específico del HoPo no depende ni del grado de compactación ni de la curva granulométrica y puede ser considerado constante.

## 6.4.2 *Densidad* (ρ)

En la figura 6.68, se presenta el andamiento de la densidad para todas las curvas que se han analizado. Como hemos destacado anteriormente, el andamiento de las curvas no está influenciado por la dirección del flujo de calor, siendo la densidad una propiedad que no varía según la dirección del calor en el modelo.





La figura 6.68, muestra el andamiento general de la densidad para las diferentes curvas granulométricas. Como se puede apreciar, el comportamiento de las diferentes curvas es muy similar. El valor de densidad ( $\rho$ ) sube a medida que aumenta el grado de compactación del modelo.

La diferencia entre las diferentes curvas, como se indica anteriormente, es muy limitada. Se puede decir que la densidad del HoPo no depende de manera significativa de las diferentes curvas granulométricas utilizadas en este trabajo. De hecho la dependencia de la composición de la mezcla, como se muestra en la figura 6.68, es muy baja.

Sin embargo, no se puede decir como en el caso del calor específico ( $C_t$ ), que la densidad no está influida por el grado de compactación. De hecho, la variación del valor de densidad entre el modelo con nivel de compactación de 5% y el modelo con nivel de compactación de 25%, está en él ordene de circa 550,00 kg/m<sup>3</sup>. Este valor no se puede ignorar, por lo tanto el andamiento de la densidad no podrá ser simplificado con una recta constante. Será una recta inclinada que sube a medida que aumenta el grado de compactación del modelo.

# 6.4.3 Conductividad térmica ( $\lambda_e$ )

En las figuras 6.69 y 6.70, se presentaran los andamientos de la conductividad térmica para todas las curvas que se han analizado. El andamiento de las rectas de tendencia, está influido por la dirección del flujo de calor en el modelo. Por lo tanto, se presenta en primer lugar el andamiento de la conductividad térmica cuando el flujo de calor en el modelo sigue la dirección Y, posteriormente se presentará el caso cuyo el flujo de calor sigue la dirección X en la probeta.



Figura 6.69: Comparación de las rectas de tendencia de todas las curvas granulométrica por la propiedad de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) con flujo de calor en dirección Y.



Figura 6.70: Comparación de las rectas de tendencia de todas las curvas granulométrica por la propiedad de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) con flujo de calor en dirección X.

La figura 6.69, muestra el andamiento de la conductividad térmica para las diferentes curvas granulométricas cuando el flujo de calor es en dirección Y. Como se puede apreciar, el comportamiento de las diferentes curvas granulométricas, siguen las mismas tendencias, pero hay comportamientos que son bastante diferentes. Se puede decir sin embargo que, el valor de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) de los modelos con flujo de calor en dirección Y, sube a medida que aumenta el grado de compactación del modelo.

Pero se puede indicar, (la figura 6.69), que hay comportamientos que no son parecidos como en los casos anteriores. Por ejemplo las curvas 7 y 3, tienen la misma tenencia, creciente al aumentar el nivel de compactación, pero las dos rectas tienen diferentes grados de inclinación. En particular, la curva 3, tiene un coeficiente de inclinación m = 0,0203, mientras, la curva granulométrica 7, tiene un coeficiente de inclinación de m = 0,0213.

La diferencia entre cada una de las curvas, es bastante limitada. Por lo tanto se puede decir que la conductividad térmica del HoPo depende de manera poco significativa de las diferentes curvas granulométricas utilizadas en este trabajo. Sin duda, no se puede decir como en el caso del calor específico ( $C_t$ ), que la conductividad térmica no está influenciada por el grado de compactación. Se puede decir por lo tanto, viendo la figura 6.69, que el factor que más influye sobre el andamiento de la conductividad térmica del HoPo, es el grado de compactación.
En el otro caso, mostrado en la figura 6.70, se ha el flujo de calor en dirección X. También en esta representación, se muestran todas las curvas granulométricas analizadas en este trabajo de tesis. A diferencia de la figura 6.69, se puede decir que las diferentes curvas granulométricas, tienen, con una buena aproximación, el mismo coeficiente de inclinación.

En este caso, el límite inferior es representado de la curva granulométrica 5 y el límite superior de la curva granulométrica 11. Como en el caso anterior, la conductividad térmica está poco influenciada por la composición de las curvas granulométricas. El factor que más influye sobre el valor de conductividad térmica es, por lo tanto, el grado de compactación del modelo. De hecho se puede ver en ambas figuras que el valor de conductividad térmica sube a medida que aumenta el grado de compactación.

Con las consideraciones hechas anteriormente, es decir que principalmente el comportamiento térmico del HoPo se ve poco influenciado por la curva granulométrica simulada, se presentan dos figuras generales. Las figuras posteriores, tienen el propósito de individuar una ecuación general para determinar el andamiento de la conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) en el HoPo.

Para construir las figuras 6.71 y 6.72 se han utilizados las ecuaciones de las rectas de tendencia calculadas anteriormente. A través de estas ecuaciones se han calculado los valores de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) de cada curva granulométrica para cada nivel de compactación. Luego se ha calculado la nueva recta de tendencia general a través el procedimiento descrito anteriormente y se ha destacado el valor de desviación estándar para cada dirección del flujo de calor.

La figura 6.71, describe el andamiento de las once curvas granulométricas cuando el flujo de calor se presenta en dirección Y. Mientras que la figura 6.72, representa los valores de la conductividad térmica de las once curvas granulométricas cuando el flujo de calor está en dirección X.



Figura 6.71: Recta tendencia por la conductividad térmica del HoPo en dirección Y.



Figura 6.72: Recta tendencia por la conductividad térmica del HoPo en dirección X.

Viendo las figuras 6.71 y 6.72, se puede confirmar que la conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) del HoPo, esta levemente influida por el tipo de curva granulométrica simulada. Por lo tanto se puede decir que, con una buena aproximación de los valores, que la conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) en el HoPo está influida principalmente por el grado de compactación.

De hecho, como se puede ver en los valores presentados anteriormente, el valor de desviación estándar está muy próximo a 1. Esto significa que considerando las diferencias entre las curvas granulométricas como no importantes, no se comete un error grande. Por lo tanto, el comportamiento del HoPo para la propiedad de conductividad térmica, puede ser representado con buena aproximación de la ecuación 6.15 en el caso cuyo el flujo de calor sea en dirección Y i a través de la ecuación 6.16 cuando el flujo de calor es en dirección X.

$$y = 0.0179x + 0.5578 \tag{6.15}$$

$$y = 0.0278x + 0.4465 \tag{6.16}$$

#### 6.4.4 Difusividad térmica ( $\alpha$ )

En las figuras 6.73 y 6.74, se presentaran los andamientos de la difusividad térmica por todas las curvas que se han analizado. El andamiento de las rectas de tendencia, está influido por la dirección del flujo de calor en el modelo. Por lo tanto, se presenta en primer lugar el andamiento de la difusividad térmica cuando el flujo de calor en el modelo sigue la dirección Y, posteriormente se presentará el caso cuando el flujo de calor sigue la dirección X en la probeta.



**Figura 6.73:** Comparación de las rectas de tendencia de todas las curvas granulométrica por la propiedad de difusividad térmica (α) con flujo de calor en dirección Y.



Figura 6.74: Comparación de las rectas de tendencia de todas las curvas granulométrica por la propiedad de difusividad térmica (α) con flujo de calor en dirección X.

#### **Consideraciones**

La figura 6.73, muestra el andamiento de la difusividad térmica para las diferentes curvas granulométricas cuando el flujo de calor es en dirección Y. a diferencia de los casos anteriores, el comportamiento de las diferentes curvas granulométricas, sigue el mismo andamiento, pero los coeficientes angulares de la recta son bastante diferentes entre ellos. Por lo tanto, cada curva granulométrica tiene una inclinación sustancialmente diferente de las otras. En general, la difusividad térmica ( $\alpha$ ) sube a medida que aumenta el grado de compactación.

La diferencia de los coeficientes angulares de cada recta se puede apreciar en la figura 6.73, es decir con el flujo de calor en dirección Y. Esto es debido al hecho que la difusividad térmica se obtiene mediante la multiplicación y división de las propiedades presentadas anteriormente. Esto implica la propagación de los errores que tienen todas las propiedades calculadas hasta ahora, es decir un aumento de la incertitud del cálculo.

En el otro caso, mostrado en figura 6.74, s el flujo de calor se encentra en dirección X. También en esta representación, se muestran todas las curvas granulométricas analizadas en este trabajo de tesis. A diferencia de la figura 6.73, se puede ver que las diferentes curvas granulométricas, tienen, con una buena aproximación, el mismo coeficiente de inclinación.

La diferencia entre las diferentes curvas, como se ha comentado anteriormente, es bastante significativa para los modelo con el fluyo de calor en dirección Y. Mientras para los

modelos con flujo de calor en dirección X, la diferencia entre las diferentes mezclas no es tan marcada. Por lo tanto, considerando que la mayor diferencia en dirección Y es debida a un acumulo de los errores, se puede decir que la difusividad térmica del HoPo depende de manera poco significativa de la composición de las curvas granulométricas utilizadas en este trabajo.

Sin duda, se puede decir que, como en el caso de la conductividad térmica ( $\lambda_e$ ), que la difusividad térmica está influida por el grado de compactación. De hecho, en las ecuaciones presentadas anteriormente, los valores "x" representan el grado de compactación de los modelos. Al revés, los valores en dirección "y" representan las diferentes propiedades del HoPo. Se puede decir, viendo las figuras 6.73 y 6.74, que el factor que más influye sobre el andamiento de la difusividad térmica del HoPo, es el grado de compactación.

### 6.5 Discusión

El objetivo principal de este capítulo es analizar los valores que se han obtenido del estudio hecho en el capítulo cinco, en la primera parte se han destacado los parámetros estadísticos que nos han permitido evaluar la calidad de los datos obtenidos. Es decir, evaluar si hay una dispersión de los resultados aceptables.

En general se puede decir que los errores que se cometen son aceptables. De hecho el valor de desviación estándar calculado para todas las propiedades en este trabajo, es siempre baja, indicando una buena calidad de los datos obtenidos. Se debe destacar, que el valor de desviación estándar sube de manera significativa a medida que aumenta el grado de compactación, alcanzado los valores máximos para el grado de compactación de 25%.

Esto, principalmente, es debido al hecho que los modelos que alcanzan este nivel de compactación son limitados, y por lo tanto no se puede hacer una depuración de los datos eficaz como en el caso de los otros niveles de compactación. La imposibilidad de muchos modelos de alcanzar un nivel de compactación del 25%, se debe principalmente a la disposición de las partículas en el modelo.

Además, en este capítulo se han analizado los resultados obtenidos para las diferentes propiedades del HoPo mostrados en el capítulo cinco. Los análisis de los resultados, hechos en este capítulo, se han enfocado sobre la construcción de la recta tendencia para cada curva granulométrica y para cada propiedad. De los análisis de los resultados se concluye que el factor que más influye en el comportamiento térmico del HoPo es el grado de compactación.

Se ha decidido determinar la recta tendencia de los modelos con el propósito de obtener una herramienta capaz de describir el comportamiento general del HoPo. De hecho, teniendo a disposición la ecuación de la recta tendencia, se pueden fácilmente calcular las diferentes propiedades.

Un aspecto más importante y más interesante de tener una relación matemática que describe el comportamiento de las propiedades del HoPo es que se puede diseñar la mezcla sabiendo que prestaciones deberá tener el HoPo. La potencialidad de tener una ecuación que describe las propiedades del HoPo, es fácilmente entendible. De hecho, se puede pensar en determinar el tipo de curva granulométrica y el grado de compactación que deberá tener el HoPo para alcanzar las propiedades pedidas.

# CAPÍTULO 7

# CONCLUSIONES

## 7.1 Introducción

Realizado el estudio expuesto en los anteriores capítulos, obtenidos los resultados y análisis de resultados de los modelos de hormigón poroso con diferentes curvas granulométricas y grados de compactación, se quiere destacar cuales son las principales conclusiones de este trabajo.

Este capítulo recoge las conclusiones generales relativas a la influencia de la utilización de diferentes curvas granulométricas para el diseño del hormigón poroso. Además se destacan las conclusiones principales relativas a la aplicación de diferentes grados de compactación a los modelos simulados.

También se recogen las conclusiones específicas donde se comentan los análisis de los resultados obtenidos según las principales propiedades presentadas del hormigón poroso.

Finalmente este capítulo contiene las posibles líneas de investigación futuras sobre la utilización del hormigón poroso como material capaz de disminuir el fenómeno de la isla de calor.

# 7.2 Conclusiones específicas

En los capítulos anteriores se han mostrados los resultados obtenidos y se han destacado las principales observaciones. Posteriormente se presentaran las conclusiones específicas por cada propiedad del HoPo estudiada en esta tesis.

Se presentarán los principales aspectos que influyen sobre el andamiento de cada propiedad, es decir densidad, calor específico, conductividad térmica y difusividad térmica.

Para cada propiedad, se harán conclusiones específicas y se destacarán los principales parámetros que afectan a cada andamiento. Finalmente se propondrá ecuaciones generales para un sencillo cálculo de las propiedades del HoPo.

#### 7.2.1 Densidad (ρ)

La densidad es una propiedad importante para determinar el contenido interno de vacíos y de áridos a del modelo. De hecho, presentando el mismo volumen, se puede apreciar la diferencia de contenido de aire en dos modelos de HoPo solo mirando el valor de densidad.

Por lo que se refiere a la densidad en el HoPo, el estudio, ha destacado que los modelos simulados tienen, en general, una óptima aproximación. Efectivamente, en el capítulo sexto, se han calculados las rectas de tendencia y, los valores de desviación estándar están todos muy cercano a 1, lo que significa que los valores obtenidos tienen una buena aproximación.

Como se destacó anteriormente, la densidad no es una propiedad que dependa de la dirección del flujo de calor, siendo una propiedad isotrópica para el HoPo. En figura 7.1 se muestra el andamiento general de la densidad en el HoPo. Con el fin de construir este gráfico, se han utilizado todas las rectas de tendencia calculadas anteriormente para las diferentes curvas granulométricas.



**Figura 7.1:** Recta de tendencia general por la propiedad de densidad (ρ) del HoPo.

La figura 7.1, destaca dos aspectos muy importantes para el HoPo, la relación de la densidad con el tipo de curva granulométrica utilizada y la relación entre la densidad y el grado de compactación del modelo simulado. En primer lugar, se puede observar en la figura 7.1 que no hay una relación importante entre el tipo de curva granulométrica simulada y la densidad. Efectivamente, suponen un nivel de compactación del 5%, la diferencia de los valores de densidad entre las diferentes curva es muy limitado, casi nulo.

En segundo lugar, en la figura 7.1, se puede observar que la densidad del HoPo está principalmente influida por el grado de compactación del modelo. De hecho se puede decir que el único parámetro que influye sobre el andamiento de la densidad en los modelos simulados es el nivel de compactación.

Además, como se destaca en la figura 7.1, la recta tendencia calculada tiene un valor de desviación estándar de 0,9968. Este valor está muy próximo a 1, lo que permite decir que la ecuación calculada para describir el comportamiento general de la densidad en el HoPo, tiene una óptima aproximación. La ecuación 7.1 muestra la relación general que describe el comportamiento de la densidad en el HoPo al variar la curva granulométrica y el grado de compactación.

$$y = 20,027x + 1472,9$$
 [kg/m<sup>3</sup>] (7.1)

A través de la ecuación 7.1, es posible calcular con una buena aproximación el valor de densidad ( $\rho$ ), representado por el parámetro "y", en función del grado de compactación, representado por el parámetro "x". En general, se puede decir que el valor de densidad del HoPo aumentará a medida que aumenta el grado de compactación.

#### 7.2.2 Calor especifico ( $C_t$ )

Del estudio y de los análisis hechos anteriormente, se puede decir que, como la densidad, el calor específico es una propiedad isotrópica para el HoPo. Es decir, que sus valores no dependen de la dirección del flujo de calor en los modelos simulados.

Por lo que se refiere a los resultados obtenidos para el calor específico, se puede decir que el nivel de aproximación es muy bueno. Se puede notar de los resultados mostrados en el capítulo quinto que la dispersión en los valores es mayor respecto a la dispersión de los resultados de densidad, pero es razonable.

En la figura 7.2 se muestra el andamiento general, destacado por los estudios hechos en los capitulo anteriores, del calor especifico en el HoPo. Con el fin de construir este gráfico, se han utilizado todas las rectas de tendencia calculadas anteriormente para las diferentes curvas granulométricas. La figura 7.2, muestra dos aspectos muy importantes para entender el andamiento del calor específico en el HoPo. En particular, muestra la relación entre el calor específico de los modelos y las diferentes curvas granulométricas. Más importante, es la relación entre el grado de compactación de los ensayos simulados y los valores alcanzados de calor específico.



Figura 7.2: Recta de tendencia general por la propiedad de calor específico (Ct) del HoPo.

En primer lugar observando la figura 7.2, se debe destacar que no se observa una particular dependencia entre las diferentes curvas granulométricas y los valores de calor específico. De hecho si se observa por ejemplo el grado de compactación de 5%, se puede ver que todas las once curvas granulométricas presentan diferencias mínimas en los valores de calor específico. Se puede por lo tanto decir que esta propiedad no está influida por las diferentes curvas granulométricas estudiadas en esta tesis.

En segundo lugar, se puede mirar en la figura 7.2, que el parámetro que más influye en el calor específico en el HoPo es el grado de compactación. En la figura 7.2, se puede también observar que la diferencia entre el valor máximo (872,850 J/kgK) y el valor mínimo (872,823 J/kgK) es de solo 0,028 J/kgK. Por lo tanto con una buena aproximación se puede decir que el calor específico no está influenciado tampoco por el grado de compactación. Se muestra, con propósito didáctico, en la ecuación 7.2 la relación con la cual se puede determinar el valor exacto de calor específico en los modelos de HoPo.

$$y = 872,85 - 0,0011x$$
 [J/kgK] (7.2)

Como se puede notar de la ecuación 7.2 y como destacado en las consideraciones anteriores, el aporte de la compactación para la determinación del valor de calor especifico en el HoPo es mínimo. Por lo tanto, cometiendo un error razonablemente pequeño, se puede considerar como constante la propiedad de calor especifico en el HoPo. Así, esta propiedad no depende de las curvas granulométricas utilizadas y tampoco del grado de compactación que alcanza el modelo de HoPo.

## 7.2.3 Conductividad térmica ( $\lambda_e$ )

El capítulo de análisis de los resultados ha destacado que los resultados obtenidos de los modelos simulados tienen una buena aproximación. Todavía, estos valores tienen una dispersión mayor respecto a los valores obtenidos para las propiedades de densidad y de calor específico. Este fenómeno se debe principalmente al hecho que la conductividad térmica depende de más parámetros como por ejemplo los números de contactos entre las partículas, los tipos de contactos y el contenido de aire en el modelo simulado.

Como se puede fácilmente intuir, estos parámetros pueden variar considerablemente en cada modelo generado. Esto es debido al hecho que el algoritmo utilizado genera una distribución de las partículas totalmente aleatoria. Además se ha destacado una mayor dispersión de los resultados en los modelos que presentan el flujo de calor en dirección Y. Efectivamente, los modelos con flujo de calor en dirección X, tienen una dispersión de los resultados muy contenida.

Esta mayor dispersión de los resultados en los modelos con flujo de calor en dirección Y es principalmente debido al hecho que se trata del mismo sentido de compactación. El desplazamiento debido a la compactación impuesta se expresa solamente en dirección Y. Este hecho hace que exista una mayor incertidumbre en los valores obtenidos en esta configuración porqué hay una mayor variabilidad en las configuraciones de las partículas. Además la dimensión del modelo simulado cambia solamente para la dirección Y, manteniéndose constante para la dirección X.

Otro aspecto que se ha destacado en el capítulo de análisis de los resultados es que la dispersión de los valores obtenidos aumenta a medida que aumenta el grado de compactación del modelo. De hecho la incertitud de los valores alcanza el máximo cuando el modelo tiene una compactación de 25%. Esto es debido al hecho que pocos de los modelos simulados alcanzan este grado de compactación y por lo tanto, se tienen menos datos estadísticos para trabajar.

En la figura 7.3, se muestra el andamiento general de la conductividad térmica de los modelos analizados cuando el flujo de calor está en dirección Y. Posteriormente, en la figura 7.4 se muestra el andamiento general de la conductividad térmica en los modelos simulados con el flujo de calor en dirección X.

Como se destaca anteriormente y como se puede observar de las figuras 7.3 y 7.4, la dispersión de los resultados obtenidos es mayor, pero se mantiene razonablemente

contenida. Además, se puede apreciar que el valor de desviación estándar calculado, está siempre cercano a 1 y su valor mínimo es de 0,9552. Esto permite de decir que la recta de tendencia general calculada para la conductividad térmica tiene una buena aproximación a la realidad.



**Figura 7.3:** Recta de tendencia general por la propiedad de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) del HoPo con flujo de calor en dirección Y.

En la figura 7.3 se muestra la recta de tendencia general calculada para la conductividad térmica del HoPo. En este primer grafico se ha considerado el flujo de calor en dirección Y, es decir en la misma dirección de la compactación. Este grafico ha sido calculado teniendo como base todas las rectas de tendencia calculadas para determinar la conductividad térmica en el capítulo sexto.

Los resultados obtenidos y la dispersión de los mismos, que es bastante contenida, han permitido calcular la ecuación general de la recta tendencia para la conductividad térmica cuando el flujo de calor es en la misma dirección del verso de compactación. La relación entre los diferentes parámetros físicos está representada por la ecuación 7.3. Los parámetros físicos que se representan en la ecuación 7.3 son la conductividad térmica (y) y el grado de compactación (x) de los modelos.

$$y = 0.0179x + 0.5578$$
 [W/mK] (7.3)

De acuerdo con la ecuación 7.3, se puede decir finalmente que el valor de conductividad térmica depende principalmente del grado de compactación del HoPo. De hecho, mirando la figura 7.3, se puede decir también que el valor de conductividad térmica aumenta a medida que aumenta el grado de compactación del modelo. Esto es debido principalmente al hecho que se generan nuevos contactos y con más superficie entre las partículas, esto aumenta la trasmisión del calor medio conducción.

Se debe destacar, que también la diferente curva granulométrica influye sobre los valores de conductividad térmica. Del estudio hecho, se ha mostrado que la curva granulométrica 7 (40% árido grueso y 60% árido pequeño) alcanza los valores más elevado por lo que se refiere a la conductividad térmica. Al revés, la curva granulométrica 3 (80% árido grueso y 20% árido pequeño) alcanza los valores más bajos de conductividad térmica por el HoPo.

Esto depende principalmente de como las partículas rellenan el modelo. Por lo tanto, una curva granulométrica capaz de rellenar todos los vacíos presentes en el modelo, alcanzará valores más elevados de conductividad térmica que si se compara con una mezcla que deja muchos vacíos en el modelo.



Figura 7.4: Recta de tendencia general por la propiedad de conductividad térmica ( $\lambda_e$ ) del HoPo con flujo de calor en dirección X.

En la figura 7.4 se muestra la recta de tendencia general calculada para la conductividad térmica del HoPo. A diferencia de la figura 7.3, se ha considerado el flujo de calor en dirección X, es decir en dirección perpendicular de la compactación. Este grafico ha

sido calculado teniendo como base todas las rectas de tendencia calculadas para determinar la conductividad térmica en el capítulo sexto.

También en este caso, la dispersión de los resultados obtenidos se encuentra bastante contenida, permitiendo calcular la ecuación general de la recta tendencia para la conductividad térmica cuando el flujo de calor es en dirección perpendicular del verso de compactación. La relación entre los diferentes parámetros físicos se representa en la ecuación 7.4. Los parámetros físicos que se representan en la ecuación 7.4 son la conductividad térmica (y) y el grado de compactación (x) de los modelos.

$$y = 0.0278x + 0.4465$$
 [W/mK] (7.4)

En este caso, la recta de tendencia, tiene una desviación estándar de 0,9846, lo que significa que la aproximación a la realidad es óptima y la dispersión de los valores está muy contenida. Como en el caso anterior, se puede decir que la conductividad térmica aumenta a medida que aumenta el grado de compactación del modelo. Las consideraciones hechas por la figura 7.3, son válidas también para el caso presentado en la figura 7.4.

Concluyendo, en este apartado se han presentados dos ecuaciones (ecuación 7.3 y 7.4) que pueden ser utilizadas para determinar el valor de conductividad térmica del HoPo con una curva granulométrica formada por dos tamaños de áridos. La determinación, utilizando una formula empírica, presenta algunas incertitudes pero se quedan razonablemente bajas.

Mirando los gráficos presentados en esto apartado, se observa que en el caso en que se haya la dirección del flujo de calor en el mismo verso de la compactación, se logran valores más bajos. Por ejemplo con una compactación de 25%, en el caso las dos direcciones coincidan, se pueden alcanzar valores cercanos a 1,001 W/mK. Al revés, con la misma compactación, pero con el flujo de calor en dirección perpendicular al sentido de compactación, se pueden alcanzar valores cercanos de 1,145 W/mk.

La consecuencia de esta observación es que se pueden alcanzar valores mejores de conductividad térmica si la dirección del flujo térmico y el sentido de la compactación coinciden. Por lo tanto, en las aplicaciones prácticas, será útil tener cuenta este aspecto importante.

Esta es, por lo tanto, una herramienta muy importante para el diseño del HoPo. Efectivamente, permite por ejemplo calcular el grado de compactación que debe tener el HoPo para alcanzar un determinado valor de conductividad térmica. Además, conociendo el grado de compactación del HoPo y sin hacer pruebas experimentales, se puede hacer una estimación del valor de conductividad térmica.

# 7.2.4 Difusividad térmica ( $\alpha$ )

El capítulo de análisis de los resultados ha destacado que los resultados obtenidos de los modelos simulados tienen una buena aproximación. Todavía, estos valores tienen una dispersión mucho mayor respecto a los valores obtenidos para las propiedades de densidad y de calor específico. Este fenómeno es principalmente debido al hecho que la difusividad térmica es una propiedad que viene calculada, con los datos presentados anteriormente y por eso está afectada por todos los errores producidos anteriormente en los valores de densidad, calor específico y conductividad térmica.

Como se puede fácilmente intuir, estos parámetros pueden variar considerablemente en cada modelo generado. Esto es debido al hecho que, dependiendo de los valores calculados anteriormente, se produce una propagación de las incertitudes anteriores. Además, de acuerdo con las observaciones anteriores, se ha obtenido una mayor dispersión de los resultados en los modelos que presentan el flujo de calor en dirección Y. Efectivamente, los modelos con flujo de calor en dirección X, tienen una dispersión de los resultados más contenida.

En la figura 7.5, se muestra el andamiento general de la difusividad térmica de los modelos analizados cuando el flujo de calor está en dirección Y. de seguido, en la figura 7.6 se muestra el andamiento general de la difusividad térmica en los modelos simulados con el flujo de calor en dirección X.

Como se indicó anteriormente y como se puede ver en las figuras 7.5 y 7.6, la dispersión de los resultados obtenidos es mayor que en los casos anteriores. Además, se puede observar que el valor de la desviación estándar, no está muy cercano a 1, de hecho su valor mínimo es 0,8555, esto indica que los resultados obtenidos tienen una mayor incertidumbre. Esto permite decir que la recta de tendencia general calculada para la difusión térmica tiene una aproximación aceptable a la realidad.



Figura 7.5: Recta de tendencia general por la propiedad de difusividad térmica ( $\alpha$ ) del HoPo con flujo de calor en dirección Y.

La figura 7.5 destaca el andamiento general de la difusividad térmica en el HoPo cuando el flujo de calor es en la misma dirección que la compactación. Este grafico se ha obtenido utilizando las rectas de tendencia que representan las diferentes curvas granulométricas. Como se puede observar, la dispersión de los valores es bastante importante.

Esto es debido, como se ha dicho antes, al hecho que la difusividad es una propiedad que depende de todas las propiedades calculadas anteriormente. Por lo tanto, se muestra una propaga de todos los pequeños errores que se había en los modelos anteriores.

La ecuación 7.5, describe la relación entre los parámetros físicos en el HoPo. En este caso, el diseño de la mezcla puede variar los valores que se obtienen. Esta variación, sin embargo, está limitada, por lo tanto la ecuación 7.5 describe con el parámetro "y" el valor de difusividad térmica y, con el parámetro "x" el valor de compactación del modelo.

$$y = 0.0057x + 0.4458 \qquad [mm^2/s] \quad (7.5)$$

Como destacado anteriormente, la difusividad térmica, depende como las otras propiedades estudiadas principalmente del grado de compactación del modelo. La ecuación 7.5 tiene un valor de desviación estándar de 0,8555, lo que significa que presenta una buena aproximación a la realidad. Se debe indicar que el valor de desviación estándar, es más lejos de 1 que con las otras propiedades.

El valor de difusividad térmica, en este caso, depende un poco también del grado de compactación. De hecho el coeficiente que multiplica el grado de compactación es 0,0057, valor muy bajo. Por lo tanto se puede decir que en este caso, la variación con el grado de compactación no está tan marcada. En figura 7.6 se presenta la recta de tendencia general por la difusividad térmica cuando el flujo de calor es en dirección perpendicular al sentido de la compactación.



**Figura 7.6:** Recta de tendencia general por la propiedad de difusividad térmica (α) del HoPo con flujo de calor en dirección X.

La figura 7.6, si se compara con la figura 7.5, tiene una dispersión de los valores menores, lo que permite calcular de manera más precisa la recta de tendencia. Como anteriormente, se puede observar que la dependencia de las curvas granulométricas no es tan significativa. Al revés, los valores de difusividad térmica están muy afectados al variar del grado de compactación.

La ecuación 7.6, describe la relación entre los parámetros físicos en el HoPo. En este caso, la variación de los valores de difusividad térmica depende menos del tipo de curva granulométrica utilizada. Efectivamente, esta variación está limitada, por lo tanto la ecuación 7.6 describe con el parámetro "y" el valor de difusividad térmica y, con el parámetro "x" el valor de compactación del modelo.

$$y = 0.012x + 0.3735$$
 [mm<sup>2</sup>/s] (7.6)

Observando la ecuación 7.6, se puede indicar que el coeficiente que multiplica el grado de compactación, es más elevado que en la ecuación 7.5. Esto permite decir que, cuando el flujo de calor es en dirección perpendicular al sentido de compactación, el valor de difusividad depende más del nivel de compactación. De hecho se puede decir, observando las figuras 7.5 y 7.6, que en el segundo caso, existe una dependencia mayor con el grado de compactación.

De los análisis de los resultados hechos en el capítulo sexto, se puede decir que en general el parámetro que más afecta el andamiento de la difusividad térmica es el grado de compactación. Se ha observado también que esta relación es más significativa cuando el flujo de calor está en dirección perpendicular al sentido de la compactación.

Se debe destacar, que también, en pequeña parte, la diferente curva granulométrica influye sobre los valores de difusividad térmica. Del estudio hecho, se ha mostrado que la curva granulométrica 7 (40% árido grueso y 60% árido pequeño) alcanza los valores más elevado por lo que se refiere a la difusividad térmica. Al revés, la curva granulométrica 3 (80% árido grueso y 20% árido pequeño) alcanza los valores más bajos de conductividad térmica por el HoPo.

## 7.3 Conclusiones generales

# 7.3.1 Conclusiones relativas al utilizo de diferentes curvas granulométricas

El estudio de los resultados hecho por el capítulo sexto, se han destacado cuales son los parámetros que más influyen en las propiedades estudiadas para el HoPo. En este apartado se destacan cuáles son los efectos sobre las diferentes propiedades utilizando diferentes curvas granulométricas.

Generalmente se puede decir que para alcanzar buenas propiedades térmicas en el HoPo es necesario diseñar mezclas que contengan un elevado contenido de aire. Esto, sin embargo, afectará la resistencia del HoPo como muestran los estudios presentados. De hecho la presencia de aire, con un valor de conductividad térmica de 0,025 W/mK, permite alcanzar valores de conductividad térmica más bajos en el ensayo.

Con esta consideración es por lo tanto posible decir que se deben preferir mezclas que incluyan un elevado contenido de aire. Por lo tanto se deben preferir curvas granulométricas que permitan, a través del tamaño de sus partículas, incluir una mayor cantidad de aire.

A través del estudio de los resultados obtenidos en el capítulo sexto, se ha destacado que la curva granulométrica que logra valores más altos de las propiedades térmicas es la curva 7 (40% árido grueso y 60% árido pequeño). Al revés, se ha destacado que la curva granulométrica que alcanza valores de conductividad y difusividad térmica más bajos es la curva 3 (80% árido grueso y 20% árido pequeño).

Esto permite de decir que la curva granulométrica que permite incluir una mayor cantidad de aire es la curva 3. Una inclusión mayor de aire en el modelo de HoPo, permite obtener propiedades térmicas mejores. Por lo tanto, se puede decir que la curva granulométrica que presenta mejores prestaciones térmicas es la curva 3 con el 80% de árido grueso y el 20% de árido pequeño. Se debe destacar también que la diferencia entre las diversas curvas granulométricas es mínima, es decir que puede ser desestimada.

#### 7.3.2 Conclusiones relativas al grado de compactación de los modelos

Lo que afecta mayormente a las propiedades térmicas del HoPo es el grado de compactación del modelo. De hecho una mayor o menor compactación de los modelos, afecta directamente el contenido de aire y el tipo de contacto entre las partículas en el HoPo. Efectivamente, una mayor compactación del modelo, compuerta una disminución del aire incluso en el HoPo.

Además, aumentando el nivel de compactación del modelo simulado, se ha observado un aumento significativo de los contactos entre las partículas. Como se ha destacado en los capítulos anteriores, el calor se distribuye mayormente a través de la conducción en los materiales como el HoPo. Por lo tanto, a medida que aumenta el grado de compactación, aumentaran los contactos entre las partículas y las propiedades del HoPo se verán afectadas de manera significativa.

Por esa razón, se han calculadas todas las ecuaciones presentadas anteriormente en función del grado de compactación. A exclusión del calor especifico, todas las propiedades objeto de este estudio, están influenciadas por el grado de compactación.

Otra consideración, fruto del estudio hecho, es que la dirección de compactación y la dirección del flujo de calor, están estrechamente relacionadas. Efectivamente se ha notado en el estudio de los resultados, que se obtenían valores significativamente diferentes para el mismo modelo, con la misma compactación pero con el flujo de calor en dos direcciones diferentes.

En todos los casos, se ha observado que, cuando el flujo de calor es en la misma dirección que el sentido de la compactación, se alcanzan mejores propiedades térmicas. Es decir, se obtienen valores de conductividad térmica y de difusividad térmica más bajos. Al revés, cambiando la dirección del flujo de calor, con el mismo modelo y misma compactación de antes, se obtienen valores más altos y por lo tanto peores propiedades térmicas del HoPo.

La diferencia que se obtiene en los dos diferente escenarios, es bastante relevante y por lo tanto no puede ser desestimada. De hecho en la tabla 7.1 dos modelos de l curvas granulométricas, 3 y 7, se puede apreciar como varían los valores de conductividad térmica a medida que cambia la dirección del flujo de calor.

Compactación del modelo [%]						
G-8	0,629	0,722	0,865	0,940	0,998	Dirección Y
	0,610	0,738	0,833	1,011	1,230	Dirección X
Diferencia	0,019	-0,016	0,032	-0,071	-0,232	]

 Tabla 7.1: comparación entre los resultados del mismo modelo con dirección de los flujos diferentes.

Como se puede ver en la tabla 7.1, en todos los diferentes grados de compactación hay una diferencia entre los valores. Para los primeros niveles, esta diferencia es razonablemente contenida. Pero, aumentando el grado de compactación del modelo, se aprecia un aumento en la diferencia entre las dos configuración. La diferencia entre las dos configuraciones, alcanza su valor máximo con el grado de compactación de 25%.

Esta observación permite decir que la relación entre la dirección del flujo de calor y el sentido de compactación del modelo, afecta de manera significativa a las prestaciones térmicas del HoPo. Generalmente, del análisis de los resultados, se ha destacado que cuando la dirección del flujo de calor es igual al sentido de compactación, se pueden alcanzar mejores propiedades térmicas. Al revés, cuando el flujo de calor y el sentido de compactación son perpendiculares, generalmente los modelos logran propiedades térmicas peores si se comparan con los mismos modelos pero con la otra configuración. Por lo tanto, si se quiere obtener buenas propiedades térmicas del HoPo, es conveniente poner el HoPo con el sentido de compactación en el mismo sentido que el l flujo de calor. De tal manera se obtendrán mejores prestaciones térmicas con la misma mezcla.

Además, con las ecuaciones presentadas en los capítulos anteriores, es posible determinar el grado de compactación que una mezcla debe tener para alcanzar determinadas propiedades térmicas. Es decir, fijando el valor de conductividad térmica que un determinado elemento en HoPo debe tener, se puede calcular exactamente el grado de compactación que el elemento deberá tener.

#### 7.4 Futuras líneas de investigación

A partir de este punto, el presente estudio debe ampliarse para que se pueda obtener una mayor cantidad de información sobre hormigones porosos con referencia a su empleo como material aislante. Unas posibles vías de investigación futuras pueden ser las siguientes:

- estudio sobre la transmisión del calor por convención en el interior del hormigón poroso, como influencia este fenómeno en el comportamiento global;
- empleo del hormigón poroso en los edificios y no solo como material para el diseño de pavimentos. Como por ejemplo el empleo del HoPo en paneles prefabricados en fachadas;
- estudio de la posición de la mejor posición para estos paneles, es decir en contacto con el ambiente externo, o en una posición intermedia en las paredes.

# **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] J. A. Voogt, «Islas de Calor en Zonas Urbanas: Ciudades Más Calientes,» [En línea]. Available: http://www.actionbioscience.org/esp/ambiente/voogt.html.
- [2] Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, Cool Pavements, 2005.
- [3] R. C. Z. Arèvalo, «Utilizacion de hormigòn poroso para rivestimiento de taludes,» Quito, 2010.
- [4] T. IH, «Effective thermal conductivity of granular porous material,» *Commun heat mass transfer*, pp. 169-176, 1996.
- [5] S. J. L. D. J. T. A. C. C. James K. Carson, «Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials,» *International Jurnal of Heat and Mass transfer*, vol. 48, pp. 2150-2158, 2005.
- [6] Y. Z. S. B. C. Lian, «The relationship between porosity and strenght for porous concrete,» *Construction and building materials,* vol. 25, pp. 4294-4298, 2011.
- [7] D. S. Ghafoori N, «Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials,» *mater Civ Eng*, vol. 7, nº 3, pp. 183-191, 1995.
- [8] N. AM., «Properties of concrete,» Longman Group, 1995.
- [9] [En línea]. Available: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/tables/thrcn.html.
- [10] N. G. Gayol, «Simulación de un proceso de embutición mediante ANSYS LS-DYNA,» 2009.
- [11] [En línea]. Available: www.ansys.com.
- [12] R. A. N. Moreno, «Caracteristicas basicas de un hormigon poroso de alta permeabilidad,» 2001.
- [13] J. L. C. G. P. N. M. Olivares, «Evaluacion de la resistencia mecanica de un hormigon segun su porosidad,» pp. 220-339, 2003.
- [14] B. M. Yukari Aoki, Development of pervious concrete, Sydney, 2009.
- [15] [En línea]. Available: http://editorial.dca.ulpgc.es/ftp/ambiente/antesol/TESIS/B-Mater.pdf.

- [16] [En línea]. Available: http://editorial.cda.ulpgc.es/ftp/icaro/Anexos/2-%20CALOR/4-Construccion/C.6.4%20Conductividad%20t%E9rmica%20y%20densidad.PDF.
- [17] F. G. M. I. J.M. Wong, «Evaluation of thermal conductivity in air permeable concrete for dynamic breathing wall construction,» *Cement & Concrete Composites 29*, pp. 647-655, 2007.
- [18] L. S. University, «Mix design development for pervious concrete in cold weather,» *National Concrete pavement Technology Center*, 2006.
- [19] M. A., «Attainable compressive strenght of pervious concrete pavins systems,» *University Central of Florida,* 2005.
- [20] [En línea]. Available: http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/07/puzlonas.html.
- [21] «monografias,» [En línea]. Available: http://www.monografias.com/trabajos55/agregados/agregados.shtml. [Último acceso: 25 04 2013].
- [22] V. L. S. P. Fernàandez L., «Estado del arte en el uso de hormigones porosos,» *Argentina: Instituto del Cemento Portland,* 2001.
- [23] H. d. S. C. V. B. F. Javier Castro, «Laboratory study of mixture proportioning for pervious concrete pavement,» *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 24, nº 3, pp. 271-284, 2009.
- [24] T. G. J. D. S. a. I. W. Oke, «Simulation of surface urban heat islands under "ideal" conditions at night.,» *Boundary-Layer Meteorology*, nº 56, pp. 339-358, 1991.
- [25] D. a. L. L. Sailor, « A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas.,» Atmospheric Environment, nº 38, pp. 2737-2748, 2004.
- [26] T. H., «Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat.,» *Energy and Buildings*, vol. 25, pp. 99-103, 1997.
- [27] M. M. Hugo Romero, «Relacion especial entre tipos de usos y coberturturas de suelos e islas de calor en Santiago de Chile,» pp. 1-7.
- [28] F. L. S. y. L. G. Correa E.N, «Isla de calor urbana: Efecto de los pavimentos,» Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 7, nº 2, pp. 11.25-11.30, 2003.
- [29] J. T. R. R. R.C. Progelhof, «Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: A review,» *Polym. Eng. Sci.,* vol. 16, pp. 615-625, 1976.

- [30] H. C.-T. P. Cheng, «Heat conduction: Thansport Phenomena in Porous Media,» *Pergamon press,* pp. 57-76, 1998.
- [31] J. Maxwell, «A treatise on electricity and magnetism, third ed.,» *Dover Publications Inc., New York,* 1954.
- [32] S. Kirkpatrick, «Percolation and conduction,» Mod. Phys., vol. 45, pp. 574-588, 1973.
- [33] T. t. o. t. t. h.-w. m. f. m. t. conductivity, «J.J. Healy, J.J. de Groot, J. Kestin,» *Physica B+C,* vol. 82, pp. 392-408, 1976.
- [34] G. J. Jing Yang, «Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials,» *Cement and Concrete Research*, vol. 33, p. 381–386, 2003.
- [35] M. Vold, «A numerical approach to the problem of sediment volume,» Journal of Colloid Science, vol. 14, nº 2, pp. 168-174, 1959.
- [36] «Guía de análisis estructural de ANSYS».
- [37] [En línea]. Available: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/spht.html.
- [38] [En línea]. Available: http://www.construmatica.com/construpedia/Conductividad\_T%C3%A9rmica.
- [39] [En línea]. Available: http://www.netzsch-thermal-analysis.com/sp/landingpages/determinacion-de-la-difusividad-termica-y-de-la-conductividadtermica/definicion-de-difusividad-termica.html.
- [40] [En línea]. Available: http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp.
- [41] T. C. K. M. L. B. David M. Levine, Statistica, Italiana ed., Milano: Apogeo, 2002.
- [42] «SPSS Free,» [En línea]. Available: http://www.spssfree.com/.
- [43] S. Mario, «Interaprendizaje de Estadística Básica,» 2011.

# **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo pudo ser escrito gracias al apoyo, paciencia y colaboración de muchas personas. Por lo mismo es probable que olvide mencionar a algunas de ellas en estas líneas, a ellos pido disculpas.

En general puedo decir que este trabajo de tesis es el punto final de un camino que me ha visto crecer y espero que sea el punto de principio por nuevas experiencias. Este largo camino ha visto la presencia de varias personas, de nacionalidades diferentes que con sus culturas y sus experiencias han puesto en migo el deseo de escribir mi trabajo en castellano. Por eso, quiero agradecer cada persona importante en mi camino en su idioma.

Un grazie speciale va al mio relatore in Italia, Liberato Ferrara, che con il suo appoggio e la sua disponibilità ha reso reale il mio desiderio. Grazie per esser stato sempre presente.

Além disso, eu gostaria de agradecer aos meus dois mentores, brasileiros, da Universitat Politècnica de Catalunya (UPC – Barcelona/España). Graças ao Sergio Henrique que me acolheu como um estudante de graduação e tem sido sempre útil em ajudar-me, e um agradecimento especial ao Ricardo que com seu conhecimento acadêmico, suas numerosas correções e sua presença constante, tornou este tese possível.

Il più grande ringraziamento va però ai miei genitori, Giuliana ed Alberto, che con il loro incrollabile sostegno morale ed economico, mi hanno permesso di raggiungere questo importantissimo traguardo. Un speciale ringraziamento va assolutamente anche al mio fratellino Andrea che ha sempre dimostrato interesse in quello che facevo il che mi ha sempre fatto pensare che stessi facendo un qualcosa di importante, dandomi la forza di andare avanti.

Vorrei ringraziare i miei amici Pasqu, Carlo, Angel, Fu e Pulci che mi hanno sempre sostenuto, mi sono sempre stati vicino anche in questo ultimo anno di profondi cambiamenti nella mia vita, grazie di esser sempre Voi!

Jag vill också tacka en mycket speciell person som har förändrat mitt liv, ett särskilt tack till min kärlek Linnea som alltid har varit nära och hjälpte mig i svåra tider. Tack för att du alltid har försökt att få mig att se den positiva sidan av allt, känner jag det med dig är allting möjligt! Jag älskar dig!

Gràcies finalment, però no menys important, a totes les persones que vaig conèixer a Barcelona! Gràcies als meus companys de classe de la Universitat Politècnica de Catalunya. Un agraïment especial a la "Catalan family", he compartit amb vosaltres moments importants, moments que romandran per sempre en la meva memòria! International dinner, Menorca, Andalusia, Sant Juan, rafting en Llavorsí i les moltes experiències junts, gràcies per fer-me creixi! Gràcies a la "família Urquinaona", on estarem en el futur, serem sempre els veïns!